

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

CARACTÉRISATION DES RÉGIMES DE PERTURBATIONS PAR LE CHABLIS ET
DES VENTS EXTRÊMES DANS L'ÉRABLIÈRE À BOULEAU JAUNE DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR

EDITH BEGIN

NOVEMBRE 2011

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier un grand nombre de gens et d'organismes sans lesquels ce projet n'aurait pu être possible. Tout d'abord, mon directeur de recherche, Frédérik Doyon, directeur scientifique de l'Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue et professeur à l'Université du Québec en Outaouais, pour m'avoir ouvert les portes à la recherche en m'offrant la possibilité de réaliser ce projet ainsi que pour sa patience et son soutien. Je tiens également à remercier mon co-directeur, Daniel Kneeshaw, pour ses judicieux conseils et son appui constant.

Un grand merci au Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies pour son soutien financier. À Mélanie Desrochers et Daniel Lesieur, du Centre d'Étude de la Forêt, qui ont facilité la collecte d'information pertinente au projet. Je suis reconnaissante envers Stéphane Daigle, du Centre d'Étude de la Forêt, Barbara Casati, d'Ouranos, David Bird et Yves Prairie, professeurs à l'Université du Québec à Montréal, ainsi qu'envers Jean-François Sénécal et Eduard Mauri Ortunõ, pour leurs précieux conseils en analyses statistiques, leurs disponibilités et leur aide. Il m'importe aussi de remercier Régis Pouliot pour son aide technique en géomatique ainsi que Srdjan Ostojic pour ses connaissances et son assistance en photo-interprétation, tous deux employés de l'Institut québécois d'Aménagement de la Forêt feuillue.

Enfin, un grand merci à mes collègues pour les longues discussions constructives sur le sujet et pour leur soutien. Il m'importe aussi de remercier chaleureusement mes amis(es) et ma famille qui m'ont apporté un grand soutien moral tout au long de cette aventure. Merci !

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES	ix
LISTE DES SYMBOLES	x
RÉSUMÉ	xi
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	3
MISE EN CONTEXTE	3
1.1. Problématique.....	3
1.2. Objectifs de recherche	7
1.3. Hypothèses de recherche.....	7
1.4. Les perturbations naturelles par chablis.....	9
1.5. Régime de perturbation par chablis.....	10
1.6. Érablière à bouleau jaune	11
1.7. Facteurs biotiques et abiotiques influençant le régime de perturbation par chablis.....	12
1.8. Perturbations atmosphériques	14
1.9. Susceptibilité des forêts.....	16
1.10. Possibilité forestière.....	17
CHAPITRE II.....	19
MÉTHODOLOGIE	19
2.1. Le territoire de l'étude et sélection des paysages échantillons	19
2.2. Volet caractérisation du régime de perturbations par le chablis.....	29
2.2.1. Méthodes.....	29
2.2.2. Évaluation de la sévérité des chablis.....	32
2.2.3. Superficie forestière affectée par le chablis.....	33
2.2.4. Distribution de fréquence des classes de tailles des chablis.....	33
2.2.5. Intervalle de retour des chablis	34
2.3. Volet caractérisation du régime des vents extrêmes.....	35
2.3.1. Méthodes.....	35
2.3.2. Distribution généralisée des valeurs extrêmes.....	37
2.3.3. Probabilités des vents modérés à extrêmes	39
2.3.4. Vitesse des vents et des rafales maximales (comparaison entre périodes)	40

2.3.5. Direction des vents.....	41
CHAPITRE III	43
RÉSULTATS	43
3.1. Volet chablis.....	43
3.1.1. Sévérité des chablis.....	43
3.1.2. Superficie affectée par sous-régions écologiques	47
3.1.3. Distribution des classes des tailles des chablis.....	51
3.1.4. Intervalle de retour	52
3.1.5. Direction des vents lors des événements de chablis	54
3.2. Volet vents extrêmes.....	56
3.2.1. Distribution de fréquence de la vitesse des vents et des rafales.....	56
3.2.2. Probabilité des vents modérés à extrêmes	65
3.2.3. Vitesse des vents modérés à extrêmes dans le temps.....	67
3.2.4. Direction des vents.....	72
CHAPITRE IV	76
DISCUSSION	76
4.1. Volet caractérisation du régime de perturbations par le chablis	76
Limites de la méthodologie.....	81
4.2. Volet caractérisation du régime de vents extrêmes.....	82
4.3. Relation entre le régime de chablis et le régime de vents	85
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	88
BIBLIOGRAPHIE.....	90
ANNEXE 1	102
Caractéristiques des quatre sous-régions écologiques du domaine de l'érablière à bouleau jaune.....	102
ANNEXE 2.....	104
Attributs des stations météorologiques	104

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Carte des sous-régions écologiques de l'érablière à bouleau jaune (Tirée du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2010a).....	20
2.2 Cartes des paysages échantillons pour chacune des périodes.....	28
2.3 Carte de l'emplacement des stations météorologiques	36
3.1 Nombre d'évènements de chablis par classe de sévérité pour chacune des sous-régions écologiques de l'érablière à bouleau jaune par période	45
3.2 Superficie totale des évènements de chablis par sous-région et par période.....	48
3.3 Moyennes des moindres carrés estimées (log) par le modèle de la superficie des taches de chablis partiel (a), total (b) et combinés (partiel et total) (c) par sous-région.....	50
3.4 Nombre de chablis et somme des superficies par classe de taille	51
3.5 Nombre de chablis par classe de taille et par période	52
3.6 Nombre de chablis par classe de taille et par sous-région	52
3.7 Diagramme de rose des vents des évènements de chablis pour chacune des sous-régions écologiques	55
3.8 Histogrammes de la vitesse horaire maximal par jour (a, b, c, d) et les rafales journalières maximales (e, f, g, h) dans les quatre sous-régions de l'érablière à bouleau jaune.....	60

Figure	Page
3.9 Distributions GEV modélisées pour la vitesse horaire maximal par jour (a) et les rafales journalières maximales (b) dans les quatre sous-régions de l'érablière à bouleau jaune.....	61
3.10 Probabilités des vents (a) et des rafales (b) modérés à extrêmes pour chacune des sous-régions écologiques de l'érablière à bouleau jaune basées sur les données ayant subi un bootstrap.....	66
3.11 Moyennes des moindres carrés estimées par le modèle des vitesses des vents modérés à extrêmes des sous-régions (a)(ouest et est), des périodes (b) 1962-1966 et 2005-2009 ainsi que les interactions (c)	68
3.12 Moyennes des moindres carrés estimées par le modèle des vitesses des vents modérées à extrêmes des sous-régions (a), et des interactions (b)	70
3.13 Moyennes des moindres carrés estimées par le modèle des vitesses des rafales modérées à extrêmes des sous-régions et des périodes 1994-1998 et 2005-2009 (modèle avec interaction)	72
3.14 Diagramme de rose des vents (maximaux journaliers).....	74
3.15 Diagramme de rose des rafales (maximales journalières)	75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
2.1 Localisation et superficie des sous-régions écologiques du territoire d'étude.....	19
2.2 Pourcentage des types de couvert forestier par sous-région.....	22
2.3 Caractéristiques des paysages échantillons.....	23
2.4 Description des variables dépendantes et indépendantes (volet chablis).....	31
2.5 Description des variables dépendantes et indépendantes (volet vents extrêmes).....	37
2.6 Seuil de la vitesse des vents et rafales.....	39
2.7 Comparaison des vitesses des vents et des rafales pour différentes périodes.....	41
2.8 Points cardinaux attribués aux différents azimuts.....	42
3.1 Nombre de taches de chablis partiel et total pour les différentes périodes.....	43
3.2 Intervalles de confiance des fréquences de sévérité (partielle et totale) pour chacune des sous-régions écologiques pour la période 2000-2009 et toutes les périodes comprises.....	46
3.3 Nombre de taches de chablis (partiels et totaux combinés), moyenne des superficies et superficie totale affectée par sous-région, cumulées sur les quatre périodes.....	47
3.4 Intervalle de retour par périodes et par sous-région écologiques.....	53
3.5 Paramètres des distributions GEV et intervalles de confiance des vitesses des vents maximaux journaliers.....	63

Tableau	Page
3.6 Paramètres des distributions GEV et intervalles de confiance des vitesses des rafales maximales journalières.....	64
3.7 Analyse de variance testant l'effet de la sous-région et de la période sur la vitesse des vents modérés à extrêmes pour les périodes 1962-1967 et 2005-2009	67
3.8 Analyse de variance testant l'effet de la sous-région et de la période sur la vitesse des vents modérés à extrêmes pour les périodes 1994-1998 et 2005-2009.....	69
3.9 Différences des vitesses des vents modérés à extrêmes entre les sous-régions estimées par le test de tukey HSD	69
3.10 Différences des vitesses des vents modérés à extrêmes entre les sous-régions et les périodes en interaction estimées par le test de tukey HSD	70
3.11 Effet des variables sous-régions et périodes lors de l'analyse de variance avec interaction.....	71
3.12 Différences des vitesses des rafales modérées à extrêmes entre les sous-régions et les périodes en interaction estimées par le Test de tukey HSD.....	72

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

A	Terre agricole
AF	Terrain agricole localisé dans les secteurs agro-forestiers
CHP	Chablis partiel
CHT	Chablis total
CPC	Creux barométrique polaire canadien
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine
GEV	Distribution généralisée des valeurs extrêmes
INO	Site inondé
Log	Logarithme
MRNF	Ministère des Ressources naturelles de la Faune
NA	Non applicable
NE	Nord-est
NO	Nord-ouest
O	Ouest
Prob	Probabilité
SIFORT	Système d'information forestière par tesselle
SIG	Système d'information géographique
SO	Sud-ouest
TBE	Tordeuse des bourgeons de l'épinette
TIFF	Tagged image file format

LISTE DES SYMBOLES

cm	Centimètre
f_o	Effectif observé
f_t	Effectif théorique
ϵ	Élément
ha	Hectare
χ^2	Khi carré
Km	Kilomètre
Km ²	Kilomètre carré
Km . h-1	Kilomètre par heure
m	Mètre
m/s	Mètre par seconde
k	Paramètre de la forme
μ	Paramètre de location
σ	Paramètre de l'échelle
>	Plus grand
\geq	Plus grand ou égale
<	Plus petit
%	Pourcentage
P	Proportion
Σ	Somme
W	Shapiro-Wilk
N	Taille de l'échantillon
ξ	Taux d'amortissement
t	t de Student
Δ	Delta

RÉSUMÉ

Les chablis semblent varier d'une région à une autre et certaines recherches prétendent qu'ils vont augmenter dans le temps à cause des changements climatiques. Cependant, bien que les chablis soient des perturbations variables temporellement et spatialement, peu d'information existe sur leurs variations actuelles et passées ou sur leurs relations avec les vents de différentes forces et directions. Les chablis font suite à des épisodes de vent violent engendrés par des conditions météorologiques spécifiques. Les différences climatiques à l'intérieur d'un domaine bioclimatique sont susceptibles de créer des différences dans le régime de perturbation par chablis. Ce projet teste cette hypothèse générale en mettant en relation l'information sur l'historique des chablis et du climat du siècle dernier. Ce projet a été effectué dans le domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune qui couvre un gradient d'est en ouest, séparé en quatre sous-régions. Des photos aériennes, anciennes et récentes et des cartes des inventaires forestiers décennaux ont été combinées dans un système d'information géographique afin de délimiter les chablis nous permettant ainsi de déterminer leurs superficies et leurs fréquences, d'estimer leur sévérité et leur intervalle de retour pour chacune des quatre sous-régions. Les archives climatiques d'Environnement Canada ont permis d'estimer la probabilité des vents extrêmes (vitesse) et de tester la similarité des régimes de ces vents à l'intérieur de sous régions de l'érablière à bouleau jaune. Lors des chablis, une prédominance des vents en provenance du sud-est est observée. La sous-région ouest de ce domaine bioclimatique est la plus touchée en termes de superficie et de sévérité. Cependant, on observe que la probabilité d'avoir des vents extrêmes est plus élevée sous le climat tempéré maritime associé aux sous-régions de l'est. L'étude démontre que les chablis sont peu fréquents durant la première moitié du siècle et que la superficie perturbée est beaucoup plus élevée vers la fin du siècle, ce qui concorde avec les projections des spécialistes du climat. Les résultats découlant de cette étude pourront servir de balises pour évaluer les risques de pertes en volume par chablis dans le calcul de possibilité forestière par les variations spatiale et temporelle de ces risques dans un même domaine bioclimatique.

Mots clés : forêt tempérée, photo-interprétation, paysage, climat, sévérité

INTRODUCTION

Le dynamisme forestier dépend de différentes perturbations naturelles, dont le chablis. Celui-ci est un événement variable caractérisé par la chute d'arbres par cassure du tronc ou déracinement partiel ou complet (Foster, 1988; Everham et Brokaw, 1996). Les chablis sont des perturbations comportant une complexité de sévérité et une variabilité temporelle et spatiale importante. À l'échelle du paysage, la compréhension de cette variabilité et la détection des patrons de récurrence associés à ce phénomène demandent un examen approfondi des caractéristiques actuelles et passées. Le climat influence considérablement la dynamique des forêts. Comme les événements de chablis font suite à des épisodes de vent violent engendrés par des conditions météorologiques spécifiques, le climat a donc une influence directe sur le régime de perturbation par chablis. Le vent (en particulier sa vitesse) devient donc un facteur déterminant et explicatif des niveaux de dégâts.

À ce jour, peu de travaux ont traité de l'importance des chablis en forêt tempérée. Il s'avère pourtant un événement perturbateur très important pour ces forêts qui contiennent une grande diversité d'espèces arborescentes et dont la longévité est grande. Ils engendrent des changements dans la composition de la forêt, réinitient la succession transformant ainsi le paysage. La compréhension de l'importance de ce phénomène sur la dynamique paysagère de la forêt permettra à l'industrie forestière une meilleure gestion du territoire dans le futur. À l'aube d'une nouvelle approche de gestion par l'aménagement écosystémique, une meilleure connaissance du régime de chablis s'avère un besoin important puisque, sous ce nouveau paradigme d'aménagement, les pratiques forestières visent à recréer des patrons comparables à ceux générés par les perturbations naturelles. Ces patrons pourraient devenir la clé d'accès pour une réussite d'aménagement étant donné que les écosystèmes forestiers sont soumis au chablis depuis des milliers d'années et qu'ils ont démontré une grande résilience face aux variations environnementales (Gauthier et al., 2008). Cette étude se propose de faire un tel exercice pour la forêt tempérée de l'est du Canada. Une compréhension des régimes de perturbation par chablis et des vents extrêmes est importante afin de déterminer si les enjeux écologiques exigent des changements stratégiques d'aménagement.

Cette étude s'inscrit dans un projet plus global visant à intégrer les notions du risque liées au calcul de la possibilité forestière. La question centrale articulée à l'intérieur de ce projet vise à déterminer comment intégrer les pertes de volumes occasionnées par le chablis dans la régularisation de l'approvisionnement des volumes de bois. Dans le cas qu'une forme de récurrence de patrons soit observée avec une fréquence non-négligeable, une gestion *a priori* viserait à tenir compte de ces pertes en amont du calcul de la possibilité forestière. À l'inverse, une trop grande stochasticité ou une fréquence trop marginale amèneraient plutôt à considérer les pertes par chablis *a posteriori* par des ajustements *ad hoc*.

Au Québec, le domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune forme une bande très étendue d'ouest en est dans laquelle on y retrouve deux climats distincts soit tempéré maritime à l'est et tempéré continental à l'ouest. Ces différences dans le climat sont susceptibles de générer des régimes de vents différents et par le fait même créer des différences dans le régime de perturbation par chablis entre les régions écologiques. Ce projet teste cette hypothèse générale en mettant en relation l'information sur l'historique des chablis et du climat. L'objectif principal de cette étude est de caractériser la dynamique du régime de perturbation par le chablis de la forêt tempérée québécoise et comprendre le rôle que le climat joue sur celui-ci. Étant donné le défi qu'est la caractérisation du régime de chablis, compte tenu de sa variation temporelle et spatiale, des objectifs spécifiques ont été poursuivis afin de répondre à cette hypothèse générale avec le plus d'exactitude possible. Le mémoire comprend en premier lieu, la mise en contexte de l'étude qui inclut la problématique, les objectifs et hypothèses de l'étude, ainsi qu'une revue de littérature de divers points clés. Suivent deux volets portant chacun sur des aspects particuliers du projet. Le premier volet traite de la caractérisation du régime de perturbation par le chablis et présente les résultats de la photo-interprétation effectuée sur les photos aériennes anciennes et récentes. Quant au 2^{ème} volet, il traite du régime des vents extrêmes associé au climat. Les résultats de chacun de ces volets seront rédigés en anglais sous forme d'article scientifique et soumis pour publication (Forest Ecology and Management) après le dépôt final du mémoire.

CHAPITRE I

1. MISE EN CONTEXTE

1.1. Problématique

Le chablis est l'affaissement d'arbres par rupture du tronc ou déracinement de petites ou de grandes étendues pouvant générer des pertes économiques pour le secteur forestier. Au Québec, les perturbations par chablis sont peu documentées et peu répertoriées, tout particulièrement dans le domaine de l'érablière à bouleau jaune. En effet, les épisodes de chablis sont plus particulièrement observés dans les domaines bioclimatiques ayant une prépondérance pour les essences résineuses plutôt que dans ceux à dominance de feuillus (Vaillancourt, 2008). Dans les sous-domaines associés à la forêt feuillue méridionale, la proportion des superficies affectées par le chablis total depuis 1974 demeurent très faibles, soit 0,0004 et 0,0009 pour l'est et l'ouest respectivement (Vaillancourt, 2008). Toutefois, de nombreuses études ayant été réalisées dans des forêts feuillues semblables à celles du Québec démontrent que les chablis peuvent affecter de façon significative le paysage forestier (Lorimer, 1977; Frelich et Lorimer, 1985; McNab et al., 2004). Dans les montagnes "Porcupine", dans l'état du Michigan, un chablis d'une grande envergure de 1000 ha a eu lieu en 1953 (Frelich et Lorimer 1985). De plus, un total de 30 chablis s'est produit lors du passage de l'ouragan Opal dans la forêt expérimental de Bent Creek dans la Caroline du Nord (MacNab et al., 2004). Ces chablis d'une moyenne de 0.7 ha étaient distribués de façon non aléatoire. En effet, dans les secteurs d'élévation de <700m, la densité moyenne des chablis étaient de 1 par 39 ha et dans les secteurs d'élévation de >700m la densité moyenne était de 1 par 192 ha. Aussi, entre 1793 et 1822, dans le Nord-est du Maine, les arpenteurs ont fait 50 références à des arbres tombés (Lorimer 1977). En 1801, ces mêmes arpenteurs ont rapporté des dommages causés par la tempête de 1795. Selon eux, dans plusieurs endroits, les arbres apparaissaient presque tous tombés. Les chablis sont donc très variables tant au niveau temporel que spatial, il est donc difficile de déceler les patrons de récurrence. Cette difficulté apporte donc des défis importants face à la gestion du risque associé à cette perturbation.

Le système climatique joue un grand rôle dans la dynamique de nos forêts. De nombreux événements météorologiques variés (ex : tornades et rafales) leur infligent des dommages de sévérité variable, ce qui demande à chacune des espèces arborescentes une constante élasticité et adaptation (Guyot, 1999). L'interaction de la circulation du vent, composé de différentes rafales de différentes grandeurs et de périodicité, avec la canopée est un phénomène complexe causant des dommages tout autant irréguliers (Allen, 1968). Dans l'Atlas canadien d'énergie éolienne (2008), la vitesse moyenne des vents à 30 mètres du sol diffère entre l'est et l'ouest ($\Delta = 0,36$ m/s en automne, $\Delta = 0,98$ m/s en hiver, $\Delta = 0,49$ m/s au printemps et $\Delta = 0,44$ m/s en été) du domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune pouvant ainsi influencer le régime de chablis. De plus, le couloir des tornades au Québec se situe sous le domaine de l'érablière à bouleau jaune rendant les régions qui le constituent plus sujettes aux événements climatiques extrêmes (Gouvernement du Québec, 2010b; Environnement Canada, 2010a; Centre canadien sciences et médias, 2011).

La compréhension du régime des vents extrêmes à différentes échelles et leur interaction avec la végétation est nécessaire pour comprendre le rôle qu'y jouent les événements de chablis. Cette connaissance devrait permettre de prévoir les modifications engendrées par de tels phénomènes et ainsi une meilleure gestion du risque associé à cette perturbation.

La gestion de nos forêts passe inévitablement par le calcul de la possibilité forestière, une activité essentielle et nécessaire à la base de l'aménagement forestier. Étant fondé sur l'information en provenance des inventaires, sur des modèles de croissance de la forêt et sur des hypothèses d'aménagement, il comporte une dose d'imprécision. Les réponses des arbres aux traitements sylvicoles demeurent difficiles à quantifier en raison des nombreuses interactions avec l'environnement physique et biotique tel que les perturbations naturelles (Gouvernement du Québec, 2004b). Les gestionnaires de la forêt doivent donc prendre en compte ces imprécisions. À cela s'ajoutent bien entendu les événements catastrophiques variables tels le feu et les chablis qui peuvent créer un effet additif. Ceci engendre une diminution du volume de bois sur pied. « Plus de 7600 ha de forêts du Témiscamingue constitués surtout de peuplements mélangés ou feuillus ont été touchés lors du chablis du 17

juillet 2006 » (Doyon et Bouffard, 2008). Lors de ce chablis, la moyenne des pertes en volume des débris de 15 cm de diamètre et plus s'est élevée à 195 m³/ha.

Dans leur analyse effectuée à partir des données d'inventaire forestier du Québec, Philibert et al., 2010 ont recensé plusieurs hectares de forêt affectés par le chablis dans l'érablière à bouleau jaune à la fin du 20^{ième} siècle. Au total (chablis partiels et totaux), 6634 ha (1^e inventaire) et 8756 ha (3^e inventaire) de forêt affectée par le chablis ont été observés dans l'érablière à bouleau jaune de l'Ouest. Dans celle de l'Est, les dommages s'étendent sur une plus petite surface, on observe 1460 ha (1^e inventaire) et 1513 ha (3^e inventaire) (Philibert et al., 2010). Ainsi, certaines sous-régions écologiques de l'érablière à bouleau jaune sont plus sujettes au chablis. La résilience des peuplements pourrait être affectée dans les sous-régions écologiques ayant une plus grande susceptibilité aux chablis et dans lesquels l'exploitation forestière est aussi omniprésente. Il est donc très important de caractériser la récurrence des chablis afin d'inclure ce risque de perte de volumes dans le calcul de la possibilité forestière et ainsi assurer la durabilité de notre gestion.

Les pratiques forestières des dernières décennies ont soulevé plusieurs interrogations quant à la préservation de l'intégrité de nos écosystèmes forestiers. Celles-ci ont généré une réflexion en profondeur sur les pratiques durables de foresterie basée sur une meilleure compréhension de fonctionnement des écosystèmes forestiers. L'approche dite d'aménagement écosystémique, est basée sur des pratiques qui visent à recréer des patrons comparables à ceux produits par les perturbations naturelles, et cela, à toutes les échelles significatives d'expressions des processus écologiques. Avant tout, le maintien d'écosystèmes viables, des attributs naturels et des paysages forestiers devraient permettre d'assurer la durabilité des biens et services tirés de la forêt (Gauthier et al., 2008). Il a aussi pour but premier de concevoir et de gérer la forêt en tenant compte des enjeux écologiques, sociaux et économiques auxquels la société fait face actuellement (Gauthier et al., 2008). Cela s'avère être un défi de taille étant donné que les cycles de perturbations naturelles sont souvent beaucoup plus longs que les horizons d'aménagement et souvent variables.

L'aménagement écosystémique a pour objectif d'élaborer des systèmes sylvicoles permettant de maintenir la dynamique forestière naturelle (Bouchard, 2008). C'est une approche d'aménagement visant à maintenir des écosystèmes sains et résilients en misant sur une diminution des écarts entre les paysages naturels et aménagés pour assurer, à long terme, le maintien des multiples fonctions de l'écosystème (Gauthier et al., 2008). Afin d'apporter une bonne gestion de l'aménagement écosystémique, il est essentiel de connaître la distribution des tailles des événements de chablis et leur répartition dans l'espace sachant que la taille d'une perturbation influence la composition, la structure et la disponibilité en bois mort. En connaissant l'importance des chablis et son rôle réel dans le paysage, il devient possible de suggérer l'importance que les différents régimes sylvicoles devraient prendre sur le territoire.

Le patron de régime de perturbation par chablis est peu connu au Québec, particulièrement dans la forêt tempérée. Ce manque de connaissances limite le développement du concept fondateur de l'aménagement écosystémique. Il est bien important de comprendre comment les perturbations naturelles par chablis « sont des agents dynamisant les écosystèmes forestiers » (Gauthier et al., 2008). Pour s'inspirer du chablis, il faut pouvoir émuler les patrons de répartition spatiale, les patrons de récurrence et les sévérités de ces perturbations naturelles. La disposition spatiale de ces événements nous renseignera sur l'organisation spatiale du territoire et la disponibilité forestière (approvisionnement en matière ligneuse), permettant, par la suite, d'établir l'écart entre les patrons des paysages régis par les coupes actuelles et ceux régis par les perturbations par chablis. Éventuellement, il sera possible de fixer des stratégies d'aménagement guidées par les perturbations (Gauthier et al., 2008). Malgré la moindre importance de l'impact des chablis en forêt tempérée qu'en forêt boréale, il n'en demeure pas moins qu'il est un des événements perturbateurs catastrophiques les plus influents de la dynamique de ces forêts ; d'où l'importance de bien comprendre le régime de perturbation par chablis de la forêt tempérée.

Différents facteurs topographiques peuvent influencer de façon importante la sévérité et la fréquence des chablis et augmenter la susceptibilité des forêts face à cette perturbation. Par exemple, les vallées dont le nombre diffère d'une sous-région à l'autre et la profondeur du sol. Ceux-ci sont plus minces dans l'ouest de l'érablière à bouleau jaune que dans l'est. Ces

facteurs de susceptibilité ne seront pas traités dans cette étude mais nous essayerons de les contrôler en choisissant des paysages semblables.

1.2. Objectifs de recherche

L'objectif principal de ce projet est de caractériser la dynamique du régime de perturbation par le chablis de la forêt tempérée québécoise et comprendre le rôle que les vents jouent sur celui-ci.

Plus spécifiquement, les objectifs sont de:

1. Déterminer s'il y a une variabilité des événements de chablis dans un grand territoire affecté par deux climats différents et déterminer si les chablis se produisent à différentes fréquences dans le temps;
2. Caractériser et comparer les vents et les rafales de différentes forces entre diverses sous-régions du domaine de l'érablière à bouleau jaune et de vérifier s'il y a des différences dans le temps;
3. Déterminer s'il y a une relation entre le régime de perturbation par chablis et les vents extrêmes.

1.3. Hypothèses de recherche

Les hypothèses de recherche sont les suivantes:

1. Il existe des différences dans le régime de perturbation par chablis entre les sous-régions de l'érablière à bouleau jaune, entre les périodes de temps (intervalle de 20 ans) et entre les sous-régions par période de temps.
 - a. L'intervalle de retour des événements de chablis est similaire entre les différentes régions. On pense rejeter cette hypothèse et on s'attend à ce que l'intervalle de retour soit plus long dans les sous-régions de l'Ouest puisque la vitesse moyenne des vents à 30 mètres du sol (selon l'Atlas canadien d'énergie éolienne, 2008) y est moins élevée que dans les sous-régions situées plus à l'est.

- b. La sévérité (partielle ou totale) des événements de chablis est similaire entre les différentes sous-régions. On s'attend à rejeter cette hypothèse étant donné que l'on croit que la fréquence des vents extrêmes et des rafales ne seront pas similaire entre les sous-régions. Une fréquence plus élevée de ces vents et rafales pourrait générer plus de chablis totaux.
 - c. La distribution de fréquence des tailles des événements de chablis est similaire entre les différentes sous-régions. On s'attend à rejeter cette hypothèse car les sous-régions de l'Ouest sont plus près des Grands Lacs du centre de l'Amérique du Nord où les rafales descendantes (downbursts) sont plus fréquentes, entraînant des chablis plus discrets et localisés. Tandis que les vents du climat maritime sont influencés par l'océan Atlantique et qu'on peut y observer des vents forts et continus pouvant causer des chablis de grandes tailles.
 - d. La distribution de fréquence des superficies des taches de chablis est similaire entre les différentes sous-régions. On s'attend à rejeter cette hypothèse étant donné que l'érablière à bouleau jaune est régie par deux climats distincts et que des régimes de vents différents peuvent en découler. Il est fort probable, qu'en présence de régimes de vent différents, que les taches de chablis soient de superficies différentes. De plus, les vallées sont plus nombreuses dans la sous-région du Centre-est comparativement aux autres sous-régions écologiques où elles sont pratiquement inexistantes. La présence de vallée peut être un facteur de susceptibilité aux chablis de plus grandes tailles.
2. Il existe des différences dans le régime climatique des vents extrêmes entre les sous-régions, entre périodes de temps et entre les sous-régions par période de temps.
- a. La distribution de fréquence de la vitesse des vents est similaire entre les différentes sous-régions. On s'attend à rejeter cette hypothèse puisque que ce domaine bioclimatique comprend deux climats distincts et donc possiblement des régimes de vents différents.
 - b. La direction des vents extrêmes est similaire entre les régions. Malgré qu'on s'attend à voir des vents en majorité d'ouest, il est possible que les

vents extrêmes proviennent d'autres directions et donc à rejeter cette hypothèse.

- c. La vitesse des vents modérés à extrêmes est similaire entre les différentes sous-régions. Malgré que les différentes régions aient possiblement des dynamiques climatiques différentes (rafales descendantes, ouragans, tornades, orages), on s'attend à observer une similitude de la vitesse des vents modérés à extrêmes puisque ceux-ci peuvent tous générer des vents extrêmes.

1.4. Les perturbations naturelles par chablis

Les perturbations naturelles induisent des modifications dans un milieu par un agent perturbateur. Elles peuvent bouleverser la totalité d'un écosystème, d'une communauté ou d'une population (Pickett et White, 1985) en apportant des changements à la fois dans la composition des espèces, la structure et les processus et fonctions écologiques d'un peuplement (Chapin et al., 2002). Le chablis est l'une d'entre elles (Pickett et White, 1985) et est responsable de la création d'une variété d'habitats (Gauthier et al., 2001). Il est hétérogène spatialement et temporellement (Ulanova, 2000) et est caractérisé par la chute d'arbres par cassure du tronc et/ou des branches et/ou déracinement partiel ou complet des racines (Foster, 1988; Everham et Brokaw, 1996; Nolet et al., 1999). Les chablis peuvent affecter la forêt aussi bien au niveau des arbres individuels qu'à celui de superficies de plusieurs hectares (Everham et Brokaw, 1996; Forget et al., 2003) et peuvent engendrer des effets importants sur plusieurs aspects. Suite à l'un d'eux, on observe l'apparition de trouées dans le couvert forestier, d'arbres tombés au sol ou à demi renversés, de l'accumulation de débris ligneux à la surface du sol, des blessures visibles aux branches et aux troncs des arbres sur pied et des perturbations du sol par la formation de creux et monticules suite au déracinement des arbres (Everham et Brokaw, 1996; Nolet et al., 1999). Ces changements affectent la structure du sol, influencent le recrutement des arbres (futur peuplement), inversent les horizons du sol (Peterson et Pickett, 1990) et modifient ainsi la composition faunique (Peterson et al., 1990; Pauli et al., 2006).

1.5. Régime de perturbation par chablis

Les caractéristiques liées à un événement perturbateur sont la force physique de l'événement perturbateur par unité de surface et de temps (intensité), la réponse des organismes (Pickett et White, 1985) et la taille de l'aire perturbée (Vaillancourt, 2008). La synthèse statistique de l'ensemble de ces caractéristiques des perturbations pour une période donnée constitue le régime de perturbations.

Plusieurs éléments permettent de caractériser un régime de perturbation naturelle tel que la fréquence, la sévérité, la distribution de taille des événements et l'intervalle de retour (Vaillancourt, 2008). Ces caractéristiques se définissent comme suit :

- La fréquence évalue le nombre d'événements perturbateurs ayant eu lieu pendant un temps donné. Elle est évaluée pour une superficie donnée.
- La sévérité estime l'effet d'un événement perturbateur sur l'écosystème (Pickett et White, 1985). En foresterie, elle est souvent caractérisée par des classes de sévérité (faible, modéré, sévère) qui font référence au pourcentage de couvert forestier ayant été touché. Ces effets peuvent être délimités ou diffus. La différence majeure entre les différentes sévérités de chablis se fait au niveau du nombre d'individus affectés (Nolet et al., 1999). Il semblerait que le taux de perturbations sévères de la canopée (mortalité élevée) soit plus faible que les perturbations légères ou intermédiaires qui, elles, laissent beaucoup d'arbres sur place (Canham et Loucks, 1984; Gauthier et al., 2008; Vaillancourt, 2008). De façon générale au Québec, dans les sous-domaines associés à la forêt feuillue méridionale (depuis 1974), il semble moins fréquent de constater des chablis totaux au sein des peuplements par rapport aux chablis partiels (Vaillancourt, 2008).
- L'intervalle de retour correspond au « temps requis pour perturber une superficie équivalente à la superficie totale de l'aire étudiée par un type d'agent perturbateur » (Vaillancourt, 2008). Cet élément nécessite une attention toute particulière puisqu'il peut être difficile d'en cerner la valeur pour des événements stochastiques peu fréquents comme le chablis. En règle générale, on observe une fluctuation de l'intervalle de retour d'une étude à une autre. Selon les données disponibles, les

temps de retour des chablis au Québec sont relativement longs comparativement à ceux rapportés dans le Nord-est américain (Vaillancourt, 2008). Dans la région Papineau-Labelle l'intervalle de retour est estimé entre 3930 et 6822 ans (Nolet et al., 1999). Quant à Lorimer (1977), il a estimé l'intervalle de retour moyen pour un chablis majeur (couvrant au moins 25 ha) à environ 1150 ans dans le Maine et selon Canham et Loucks (1984), l'intervalle de retour a été estimé à 1210 ans dans le Wisconsin. Toutefois, on observe une grande démarcation du temps dans la revue de littérature de Vaillancourt (2008). Selon cette auteure, l'intervalle de temps de l'érablière de l'est est de 241 300 ans et dans l'ouest de 109 010 ans. Ces résultats ne sont pas en concordance avec ceux de Nolet et al., (1999) qui observent plutôt des intervalles se situant entre 3930 et 6822 ans dans l'ouest de l'érablière à bouleau jaune.

- La distribution de taille des perturbations correspond à la distribution de fréquence des tailles de chablis ayant eu lieu sur un territoire donné (Vaillancourt, 2008). Elle peut être exprimée en fonction de classes de sévérité.

1.6. Érablière à bouleau jaune

Au Québec, l'érablière à bouleau jaune est située dans la partie méridionale de la province dans la zone tempérée nordique (Gouvernement du Québec, 2003) et dans la sous-zone de la forêt décidue (Gouvernement du Québec, 2004a). On retrouve, à sa limite supérieure, le domaine de la sapinière à bouleau jaune et de la bétulaie jaune à sapin. À sa limite inférieure, on retrouve deux domaines ; celui de l'érablière à tilleul et de l'érablière à caryer cordiforme. Le domaine de l'érablière à bouleau jaune couvre une surface de 65 759 km² et comprend 23 unités de paysage (Robitaille et Saucier, 1998). L'altitude moyenne de ce domaine bioclimatique est de 337 m, sa pente moyenne de 9.57%, l'amplitude moyenne de 101 m. Le dépôt de surface dominant est le till indifférencié mince et son régime hydrique est nettement prédominé par un régime mésique (Robitaille et Saucier, 1998).

Selon le Gouvernement du Québec (2004a), ce domaine couvre les coteaux et les collines qui bordent le sud du plateau laurentidien et des Appalaches. Le bouleau jaune est l'essence la

plus commune qui accompagne l'érable à sucre dans le domaine de l'érablière à bouleau jaune. De plus, le hêtre à grandes feuilles, le chêne rouge et la pruche du Canada sont aussi présents. Ce domaine est aussi caractérisé par la fin de l'aire de distribution de tilleul d'Amérique et de l'ostryer de Virginie.

1.7. Facteurs biotiques et abiotiques influençant le régime de perturbation par chablis

Le vent est l'un des principaux facteurs abiotiques jouant un rôle prépondérant en relation avec les chablis. Selon Ruel (2000), il est le premier facteur qui doit être examiné pour comprendre la vulnérabilité au chablis. Ce facteur est l'un des aspects principaux de cette étude. Les autres facteurs qui nous intéressent jouant un rôle important sont les espèces arborescentes présentes (Foster, 1988), la physiographie de la région (Canham et Loucks 1984) et les caractéristiques de la tempête en cours (Sousa, 1984). Le risque de chablis ne dépend pas d'un seul facteur mais de l'interaction de plusieurs facteurs biotiques et abiotiques qui influencent la sévérité des chablis à l'échelle des peuplements et du paysage. Cette complexité d'interactions peut rendre un simple événement de perturbation difficile à caractériser et à prédire (Peterson, 2000a; Everham 1996).

Selon Guyot (1999), la vitesse du vent croît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du sol. Toutefois, il existe un très fort gradient vertical de vitesse du vent près du sol, diminuant rapidement avec l'altitude (l'augmentation de la vitesse des vents se fera de façon plus lente). On observe cette diminution au alentour de 10 m du sol. Le flux vertical de quantité de mouvement n'est pas non plus régulier en fonction de la hauteur à l'intérieur du couvert forestier. Selon cet auteur, la biomasse forestière (feuilles, troncs et branches) agit sur l'écoulement de l'air au même titre qu'un frein aérodynamique. La résistance à celui-ci dans le couvert forestier dépend du coefficient de traînée des feuilles et de l'indice foliaire. Dans le même ordre d'idée, Finnigan et Brunet (1995) constatent que l'absorption du flux de quantité de mouvement s'effectue presque uniquement dans la partie supérieure du couvert.

La direction des vents semble avoir une importance dans le régime de perturbation. Dans les travaux de Ruel, (2000), la région de Charlevoix a été plus particulièrement affectée par des vents en provenance du nord-ouest. Les sites exposés au vent provenant de l'ouest sont plus précurseurs de renversements (Vezina et Paillé, 1969) puisque la circulation des vents dominants forme un grand circuit d'ouest en est (Girardin et al., 2008). Selon Guyot (1999), c'est la décroissance de la température, en se dirigeant vers le pôle Nord, qui crée une composante dominante du vent de secteur ouest. De plus, les arbres sont plus vulnérables au chablis lorsqu'ils sont soumis à des vents provenant d'une autre direction que celle habituelle. En effet, les individus acquièrent une meilleure résistance en s'adaptant au vent de direction dominante par l'entremise d'une organisation adaptative architecturale des racines (Danjon et al., 2009). On retrouve un nombre plus élevé de racines ramifiées du côté des vents dominants. Lorsque des vents proviennent de directions différentes, la résistance des racines à la pression exercée sur celle-ci s'avère plus grande due au nombre peu élevé de racines et de leurs ramifications. La vitesse et la direction du vent semblent être, a priori, les facteurs abiotiques les plus influents sur la possibilité de chablis au niveau du paysage. Nos efforts d'analyse de l'aspect climatique ont été tournés en ce sens.

D'après Guyot (1999), la topographie d'un territoire apporte plusieurs effets sur le vent. Ainsi, dans les endroits de pente forte, on observe la formation de tourbillon dont l'axe est horizontal. L'effet de colline montre « une accélération du vent sur les côtés et surtout au voisinage de son sommet », puis derrière la colline un ralentissement de la vitesse du vent et une forte turbulence (Guyot, 1999). Selon cet auteur, les vallées ayant une largeur moyenne de quelques km ont un effet dynamique direct sur les vents. Elles permettent au vent de basse couche de voyager dans la direction de l'axe de la vallée formant un couloir. Comme la section topographique transversale des vallées n'est pas constante, on observe des courants de retour lorsque la vallée s'évase de nouveau (Guyot, 1999).

La profondeur des sols joue aussi un rôle important dans la force d'ancrage des arbres au sol. Ceux qui croissent dans des sols minces sont plus susceptibles au déracinement dû à un ancrage superficiel des racines dans le sol (Everham et Brokaw, 1996). De ce fait, les lisières arborescentes des milieux aquatiques pourraient être des zones susceptibles aux chablis.

Selon Steinblums (1978), les arbres dont les racines sont incluses dans la ligne des hautes eaux pourraient avoir une implication dans les chablis en bordure de lacs ou de rivières du à un mauvais développement des racines ainsi qu'un mauvais ancrage au sol lors d'inondations.

1.8. Perturbations atmosphériques

L'énergie solaire et les échanges thermiques sont les moteurs de tous les flux aussi bien au niveau du cycle de l'eau que des régimes climatiques ou des mouvements de l'atmosphère (Guyot, 1999). Ce sont les instabilités énergétiques entre le sol et l'atmosphère ainsi que celles entre les hautes et basses latitudes qui sont les moteurs de la circulation atmosphérique. Selon cet auteur, c'est dans la troposphère (située entre le sol et une altitude de 11 km) qu'ont lieu presque tous les phénomènes météorologiques. Celui nous intéressant est la formation des vents. Il est la résultante du gradient local de la pression atmosphérique et de la force engendrée par la rotation de la Terre (Guyot, 1999). Selon cet auteur, les mouvements atmosphériques horizontaux (qui dépendent du champ de pression atmosphérique) peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres par seconde alors que les mouvements verticaux n'atteignent que quelques centimètres par seconde. Malgré une vitesse de déplacements moins grande des mouvements verticaux, ce sont eux qui sont responsables des modifications de la stabilité verticale de certaines couches de l'atmosphère. Il est à noter que le vent est un déplacement de l'air presque uniquement horizontal sauf dans les endroits où la topographie joue un rôle important (zones montagneuses). La variation de la vitesse du vent horizontal est liée à l'atténuation progressive des forces de frottement avec l'altitude (Guyot, 1999).

Les vents extrêmes résultent d'un déplacement de l'air dont le seuil de vitesse est de 23 m/s (Péguy, 1970; Besson et al., 1996; Boubaker et Fehri, 2009; Environnement Canada, 2010b). Il existe de nombreux événements météorologiques majeurs caractérisés par des vents extrêmes causant des dommages à la végétation à travers le monde ; des ouragans dans le nord de l'Amérique (Foster, 1988) et dans les Caraïbes (Imbert, 2002), des rafales descendantes (downbursts) dans le centre de l'Amérique du Nord (Frelich et Lorimer, 1991), des vents forts (dépression de l'Atlantique) en Europe (Cassou, 2004), des cyclones au Japon

(Bellingham et al., 1996), en Nouvelle-Zélande (Collins, 1988), et dans les Iles du Pacifique (Elmqvist et al., 1994), sans compter les orages et les tornades qui ont lieu dans plusieurs régions du monde. Ces forts épisodes de vent peuvent affecter de grandes superficies (Ruel et Benoit, 1999) causant des chablis majeurs ou mineurs (Vaillancourt, 2008).

D'après Guyot (1999), les ouragans sont une dépression isolée, circulaire comprenant un diamètre de 100 à 1000 km. En effet, dans son centre se trouve l'œil du cyclone autour duquel tournent des vents très violents dont la vitesse peut dépasser $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Ils se forment et se déplacent sur les surfaces maritimes avec un mouvement général est-ouest et utilisent l'énergie thermique libérée par la condensation de l'eau. C'est pourquoi on les observe surtout à la fin de l'été. Les ouragans ne se forment généralement pas au-dessus de 35° de latitude et meurent en atteignant les latitudes tempérées à cause de son alimentation énergétique qui diminue dans les eaux froides (Guyot, 1999). C'est l'une des raisons pour laquelle les ouragans sont des événements rares au Québec. Toutefois, il ne faut pas minimiser leur impact puisque ces événements météorologiques engendrent des vents violents qui peuvent se faire ressentir jusqu'au Québec. Selon Boose et al (1994, 2001), la côte est de l'Amérique est tout particulièrement affectée par les ouragans. Ils ont observé que la sévérité et l'intensité des dommages décroissent de la zone côtière vers les zones situées à l'intérieur du continent. Les dommages plus grands se situent habituellement à la droite du chemin parcouru par la tempête, là où les vents ont une vitesse plus grande. Ceci coïncide avec le mouvement de rotation autour du centre de la tempête.

Les tornades sont caractérisées par des vents formant des tourbillons hautement convergents (Fujita, 1981). Selon Environnement Canada (2007), on compte environ 80 à 100 tornades par année au Canada. Au Québec les couloirs de tornades se situent dans le sud-est et sud-ouest de la province (Gouvernement du Québec, 2010b; Environnement Canada 2010a; Centre canadien sciences et médias, 2011). Selon le Gouvernement du Canada, elles se produisent généralement entre avril et septembre (Gouvernement du Canada, 2010). Le temps chaud et humide ainsi que le développement d'orages causé par la collision des masses d'air frais et d'air chaud sont précurseurs de tornades (Environnement Canada, 2010a). Selon les travaux de Fujita (1981), leurs dommages peuvent s'étendre sur 100 km de longueur et

1000 m de largeur. Toutefois, selon Newart (1984) la tornade canadienne cause des dommages dont la dimension médiane est de 6 km de longueur et de 80 mètres de largeur. Le domaine de l'érablière à bouleau jaune se situe sous le couloir de tornades au Québec.

Les orages sont dus à une chaleur intensive durant la saison chaude (Fujita, 1981). Or, de forts orages peuvent générer des vents dommageables grossièrement divisés en tornade et en des vents de ligne droite (en couloir) non divergente (Fujita, 1981). Ces rafales descendantes deviennent horizontales lorsqu'elles touchent le sol, pouvant générer des vents de $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (Environnement Canada). Les rafales descendantes (downbursts) sont un autre type de vent tout aussi dommageable (Fujita, 1981). Elles sont semblables au vent en ligne droite, mais contrairement à lui, elles sont hautement divergentes. Ce type de perturbation varie beaucoup en termes de taille. Les plus grandes peuvent faire des dommages sur plusieurs milliers d'hectares (Peterson, 2000b). Les fronts sont caractérisés par une brusque variation lors du passage d'une masse d'air à une autre (Guyot, 1999). Selon cet auteur, des perturbations peuvent naître le long des fronts en formant des cisaillements dynamiques (convergence).

Au-dessus du Québec, les conditions moyennes de circulation atmosphérique se caractérisent par un creux barométrique polaire canadien (CPC) (Girardin et al., 2008). Le modèle tridimensionnel climatique prédit une augmentation de l'intensité des tempêtes de vents violents (Dufresne et al., 2006). Or, ces événements climatiques extrêmes ou un changement brusque et de trop grande amplitude des températures et/ou des précipitations, pourraient compromettre la stabilité des écosystèmes forestiers (Forget et al., 2003).

1.9. Susceptibilité des forêts

Nous savons que certains peuplements sont plus susceptibles que d'autres. De façon générale, les événements de chablis semblent être plus nombreux dans les régions où l'on retrouve une dominance d'essences résineuses comparativement aux régions à dominance de feuillus (Vaillancourt, 2008; Nolet et al., 1999; Kneeshaw et al., 2008). La susceptibilité au chablis est moins grande pour les essences de feuillus (Foster, 1988; Danjon et al., 2009), probablement, à cause de leur plus haute densité du bois (Zhang et al., 1999) et leur

enracinement plus profond (Everham et Brokaw, 1996). Selon Renaud (2002), Renaud et Hervé (2005), Rosa (2004) et Renaud (2005), le chêne et le frêne sont les deux espèces les moins vulnérables au chablis. Le diamètre du tronc des arbres est aussi source d'influence à la résistance de ceux-ci aux cassures. Cette relation positive entre le diamètre des arbres et la susceptibilité d'être renversés a été confirmée par divers écrits (Webb 1989; Arévalo et al., 2000; Canham et al., 2001). Canham et al., (2001) ont observé une meilleure résistance au chablis du bouleau jaune et de l'érable à sucre à DHP 40 et 70 cm, ainsi que le hêtre à grandes feuilles à DHP (diamètre à hauteur de poitrine) de 10 cm. En somme, toutes les essences sont vulnérables face au chablis avec l'augmentation du diamètre. Cela permet de supposer que les habitats post-chablis récents possèdent sur le sol une grande quantité d'arbres morts de gros diamètre. Toutefois, les plus fragiles sont l'épinette noire et le sapin baumier (Rich et al., 2007). Il n'y a pas que le diamètre des arbres qui peut augmenter la vulnérabilité au chablis. D'autres facteurs, par exemple la présence de maladie racinaire, peuvent amoindrir la résistance à la casse des racines et au renversement de l'arbre. L'étude de Nolet et al., (2001) dans le secteur du Bassin de la Lièvre, démontre que les dégâts causés par le vent furent généralement plus abondants dans les peuplements résineux surannés, particulièrement ceux qui étaient ouverts suite au passage de la tordeuse des bourgeons d'épinettes (TBE).

La hauteur des arbres représente sans conteste le premier facteur de risque (Colin et al., 2009). Lorsqu'une zone de forêt est affectée par des vents importants, les individus les plus vulnérables sont généralement ceux de grandes tailles (Peterson et Pickett., 1991). Selon Colin et al., (2009) cet effet est plus marquant chez les feuillus plus particulièrement chez le hêtre. Par contre, Peterson (2007) a observé que, lors des événements les plus sévères, presque tous les arbres étaient renversés, incluant les espèces les moins susceptibles.

1.10. Possibilité forestière

La possibilité forestière correspond à la possibilité annuelle de coupe à rendement soutenu (Côté, 2000). Le calcul de possibilité forestière représente une composante capitale de l'aménagement forestier durable (Deraps, 2008) car il exprime le volume marchand annuel

moyen disponible et cela de façon soutenue à moyen et long terme (soit 150 ans pour le Québec (Gouvernement du Québec, 2004b)). Son calcul s'appuie sur l'inventaire forestier, des modèles de croissance en volume marchand et des interactions entre ces composantes et les hypothèses d'aménagement (Gouvernement du Québec, 2004b). Ces éléments incluent tous une dose d'imprécision qui se propage inévitablement au calcul de la possibilité. De plus, bien que le calcul vise à prédire le comportement d'un système naturel, il n'inclut pas le risque des événements de perturbations tels les chablis à cause de leur nature variable. Cependant, lorsque les volumes récoltables sont prédits pour des périodes lointaines, par exemple, de 90 à 150 ans, cela augmente la probabilité de voir apparaître des événements rares ou imprévisibles au cours de la période de planification. Ceux-ci viennent affecter lourdement le capital sur pied, apportant des changements importants dans les volumes disponibles et la cédule spatio-temporelle de récolte. Par exemple, en juillet 2006, des orages violents accompagnés de rafales ont endommagé 21 000 ha de forêt s'étendant de la frontière de l'Ontario à la région de la Mauricie (Gouvernement du Québec, 2007). Sur cette superficie, 40 % des peuplements feuillus ont été endommagés soit 8500 ha. Les plus touchés sont les érablières et les peuplements feuillus intolérants avec des superficies touchées de 5000 ha 3040 ha respectivement. Ainsi, prendre en compte ce risque et, si possible, le traduire en informations utiles aux gestionnaires de la forêt pour le calcul de la possibilité forestière est important et constitue les objectifs ultimes du programme de recherche dans lequel ce projet s'inscrit.

CHAPITRE II

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Le territoire de l'étude et sélection des paysages échantillons

Le domaine bioclimatique de l'érablière à bouleau jaune du Québec, Canada est l'objet de l'étude sur laquelle nous évaluerons les chablis et les vents extrêmes (Figure 2.1). Ce territoire est constitué d'une large bande comprise entre 45°00' et 47°30' degrés de latitude nord et 70°00' et 79°30' degrés de longitude nord subdivisé en unités secondaires (Ouest, Centre-ouest, Centre-est, Est) correspondant aux sous-régions écologiques de ce domaine bioclimatique (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 Localisation et superficie des sous-régions écologiques du territoire d'étude

Sous-régions	Latitude	Longitude	Superficies (Km ²)
Est	45°00' et 47°15'	-70°00' et -72°00'	17 370
Centre-est	45°45' et 47°30'	-72°00' et -74°30'	17 065
Centre-ouest	45°45' et 46°45'	-74°30' et -76°30'	12 392
Ouest	45°45' et 47°30'	-76°00' et -79°30'	18 932

Ce projet contient une composante spatiale qui compare les différences/similarités entre les sous-régions du domaine de l'érablière à bouleau jaune et une composante temporelle qui évalue les différences/similarités sur certaines décennies. Pour chaque sous-région (Est, Centre-est, Centre-ouest, Ouest), et cela, par période (1926-1936, 1945-1955, 1970-1980, 2000-2009), quatre paysages échantillons ont été sélectionnés selon un *échantillonnage non aléatoire au jugé* (Scherrer, 1984), couvrant chacun 160 ± 15 km². Au total, nous avons 64 paysages échantillons (N=64), couvrant une superficie de 10 240 km² pour les quatre périodes évaluées (Figure 2.2).

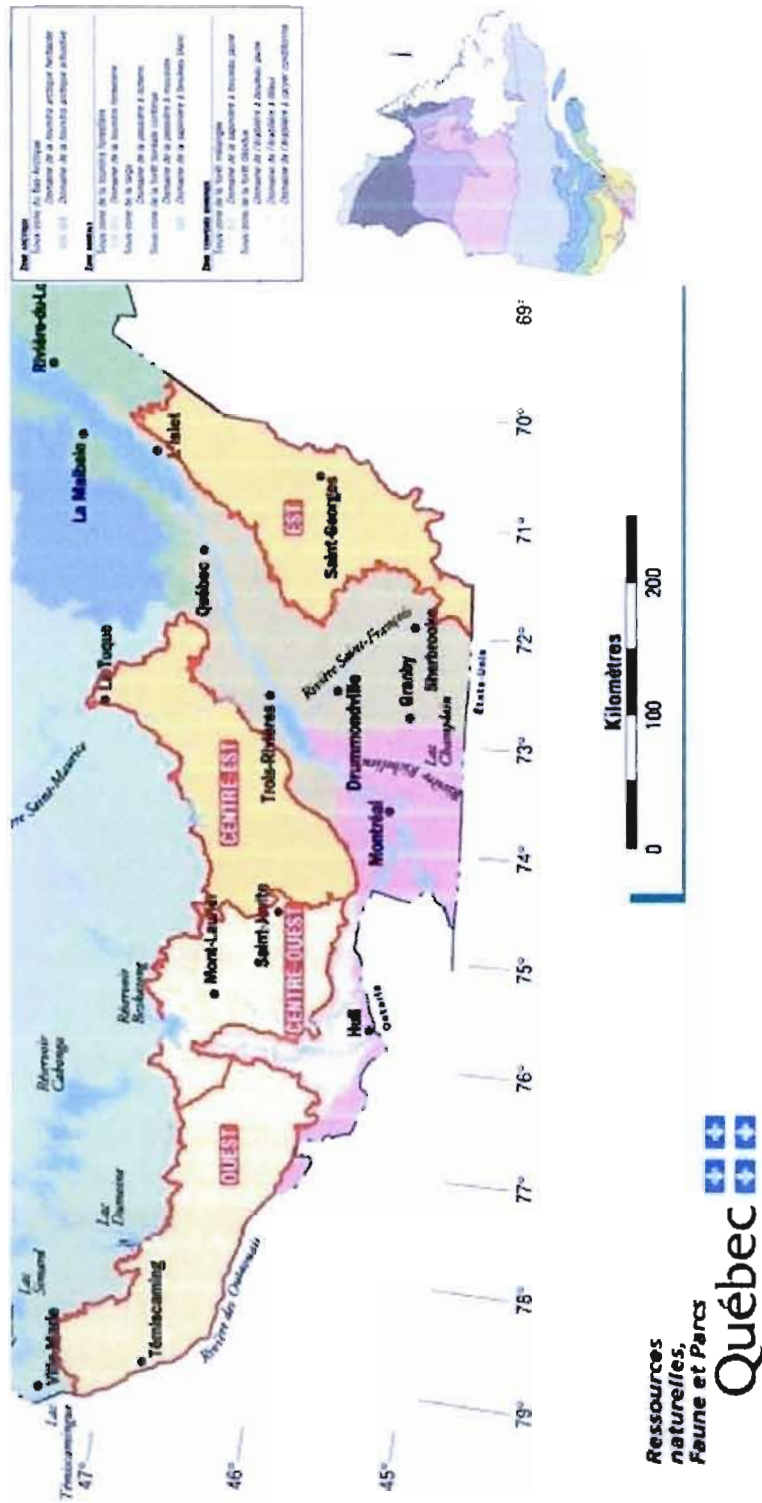


Figure 2.1 Carte des sous-régions écologiques de l'érablière à bouleau jaune (Tirée du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2010a)

La disponibilité limitée des photos aériennes anciennes pour certaines unités de paysage nous a obligés à effectuer en premier lieu un *échantillonnage non aléatoire au jugé* (Scherrer, 1984). Seules les portions de paysages pour lesquelles nous disposions de photos aériennes anciennes ont été retenues. Un effort important a été fourni afin d'obtenir des paysages échantillons comparables du point de vue de la végétation et du milieu biophysique. Pour ce faire, nous avons établi des critères spécifiques de sélection. Le premier critère était de s'assurer que chaque paysage échantillon ait des proportions similaires en type de couvert. Les deux autres critères utilisés ont servi à s'assurer que la portion du territoire forestier productif soit similaire entre les paysages échantillons. Pour ce faire, nous avons calculé la superficie en terrain agricole et en plans d'eau ou des zones inondées ainsi que les terres humides non productives telles que les dénudés humides et secs et les aulnaies. Les pourcentages des superficies des types de couvert forestier (F, M, R), des superficies en plans d'eau (lacs, rivières, ruisseaux, étangs, "EAU"), ou en zones inondées ("INO"), les essences forestières de moins de 3 mètres (essences indéterminées: Rx, Rz, Fx, Fz et Fn) ainsi que ceux des espaces attribués à l'agriculture ("A", "AF") ont été obtenues à l'aide des cartes écoforestières du 4^e décennal (Gouvernement du Québec - Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, 2004c) et calculés à l'aide d'un système d'information géographique (SIG, Arc Gis, version 9.2).

Puisque la sévérité et la distribution des chablis sont influencées dans bien des cas par l'aspect physique du paysage (Kramer et al., 2001; Ruel, 2000; Canham et al., 2001), il est essentiel d'avoir un bon aperçu des caractéristiques du territoire dès le commencement de l'étude. L'annexe 1 dresse les caractéristiques écologiques et climatiques des quatre sous-régions (Robitaille et Saucier, 1998; Atlas canadien d'énergie éolienne, 2008). Ainsi, pour l'ensemble des paysages échantillons, on trouve en moyenne 35,5 % de forêt feuillue, 48,9% de forêt mixte et 15,5% de forêt résineuse (Tableau 2.2). Aucun des paysages échantillons ne possède plus 17 % en superficie agricole et 18% en superficie représentant des plans d'eau ou des zones inondées (Tableau 2.3).

Tableau 2.2 Pourcentage des types de couvert forestier par sous-région

Sous-régions	% forêt feuillue	% forêt mixte	% forêt résineuse
Est	32,9 ± 10.7	47,0 ± 7.5	20,1 ± 5.5
Centre-est	34,0 ± 9.7	49,1 ± 9.9	16,9 ± 5.5
Centre-ouest	48,8 ± 9.3	41,8 ± 6.9	9,3 ± 5.8
Ouest	26,5 ± 9.6	66,7 ± 6.1	15,6 ± 7.7

À partir des cartes de Robitaille et Saucier (1998), on compte quelques vallées dans la sous-région écologique du Centre-est de l'érablière à bouleau jaune. Par contre, elles sont pratiquement inexistantes dans les autres sous-régions. De plus, c'est dans les sous-régions écologiques du Centre-ouest et de l'Ouest que l'on retrouve les sols les plus minces (Robitaille et Saucier, 1998).

Tableau 2.3 Caractéristiques des paysages échantillons

Sous-régions	Périodes	Paysages échantillons (réfère au No. de feuillet des cartes topographiques)	Aire total (km ²)	Aire forestière productive (km ²)*	Aire aquatique et espace inondé (%)	Aire alloué à l'agriculture (%)	% forêt feuillue productive	% forêt mixte productive	% forêt résineux productive
Est	1926-1936	21L09NO_NE_1	155	143	2,5	1,5	20,0	59,8	20,3
		21L08SO_SE_1	159	143	1,2	2,4	22,4	52,7	24,8
		21L01SO_21E16NO_SO_1	159	143	1,2	2,4	29,3	47,3	23,5
		21E03NO_21E06SE_SO_1	175	161	17,4	10,1	47,6	34,3	18,2
	1945-1955	21L09NE_2	161	148	2,3	1,7	23,4	52,3	24,2
		21E07NO_NE_2	156	139	2,2	3,1	32,6	42,3	25,1
		21E10NO_NE_2	164	134	0,3	17,0	48,5	42,4	9,1
		21E04SO_SE_2	163	135	1,8	13,8	40,5	44,4	15,0
	1970-1980	21L09NO_NE_1	155	143	2,5	1,5	20,0	59,8	20,3
		21L08SO_SE_1	159	143	1,2	2,4	22,4	52,7	24,8
		21L01SO_21E16NO_SO_1	159	143	1,2	2,4	29,3	47,3	23,5
		21E03NO_21E06SE_SO_1	175	161	17,4	10,1	47,6	34,3	18,2

* Les superficies des terrains à vocation non-forestières et les terrains forestiers improductifs n'ont pas été inclus (Gouvernement du Québec - Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2011b).

Tableau 2.3 (Suite)

Sous-régions	Périodes	Paysages échantillons (réfère au No. de feuillet des cartes topographiques)	Aire total (km ²)	Aire forestière productive (km ²)	Aire aquatique et espace inondé (%)	Aire alloué à l'agriculture (%)	% forêt feuillue productive	% forêt mixte productive	% forêt résineuse productive
Est	2000-2009	21E07NO_NE_2	156	139	2,2	3,1	32,6	42,3	25,1
		21L09NE_2	161	148	2,3	1,7	23,4	52,3	24,2
		21E10NO_NE_2	164	134	0,3	17,0	48,5	42,4	9,1
		21E04SO_SE_2	163	135	1,8	13,8	40,5	44,4	15,0
Centre-est	1926-1936	21M04SO_1	159	147	4,9	1,4	29,3	61,2	9,5
		31P07NO_1	160	139	9,1	0,04	30,9	49,3	19,8
		31I14NO_NE_1	156	144	6,1	0,0	21,9	62,8	15,4
		31I05NO_1	159	143	7,7	0,0	35,8	51,1	13,0
	1945-1955	21L13NE_21L14NO_2	160	130	3,2	2,5	38,1	37,2	24,7
		31P07NO_SO_2	160	143	6,9	0,0	30,5	55,0	14,5
		31J01NO_NE_SO_SE_2	159	131	6,8	0,6	40,0	41,7	18,3
		31J07NO_NE_2_CE	162	142	6,2	0,1	51,8	37,9	10,3
	1970-1980	31P07NO_1	160	139	9,1	0,04	30,9	49,3	19,8
		31I14NO_NE_1	156	144	6,1	0,0	21,9	62,8	15,4
		31I05NO_1	159	143	7,7	0,0	35,8	51,1	13,0
		21L13NE_21L14NO_2	160	130	3,2	2,5	38,1	37,2	24,7

Tableau 2.3 (Suite)

Sous-régions	Périodes	Paysages échantillons (réfère au No. de feuillet des cartes topographiques)	Aire total (km ²)	Aire forestière productive (km ²)	Aire aquatique et espace inondé (%)	Aire alloué à l'agriculture (%)	% forêt feuillue productive	% forêt mixte productive	% forêt résineuse productive
Centre-est	2000-2009	21L13NE_21L14NO_2	160	130	3,2	2,5	38,1	37,2	24,7
		31J01NO_NE_SO_SE_2	159	131	6,8	0,6	40,0	41,7	18,3
		31P07NO_SO_4	159	145	5,6	0,04	13,3	64,5	22,2
		31J07SE_4	159	152	2,7	0,0	47,6	45,1	7,4
Centre-ouest	1926-1936	31J03SE_31G14NE_1	158	143	8,2	0,005	53,9	42,5	3,7
		31J05NO_NE_1	162	137	10,7	0,3	58,1	34,1	7,8
		31O04SE_31J13NE_1	162	137	8,0	0,0	31,9	47,8	20,3
		31O04SE_31O03SO_31J13NE_31J14NO_1	161	144	8,9	0,0	41,4	53,5	5,1
	1945-1955	31J02NE_SE_31J01SO_NO_2	163	132	4,4	1,2	56,2	33,8	9,9
		31J07NO_NE_2_CO	162	140	6,0	0,6	51,9	40,1	7,9
		31J04NO_SO_2	168	144	12,7	0,2	39,7	49,8	10,4
		31K09NO_NE_2	160	142	8,5	0,0	41,0	39,2	19,8

Tableau 2.3 (Suite)

Sous-régions	Périodes	Paysages échantillons (réfère au No. de feuillet des cartes topographiques)	Aire total (km ²)	Aire forestière productive (km ²)	Aire aquatique et espace inondé (%)	Aire alloué à l'agriculture (%)	% forêt feuillue productive	% forêt mixte productive	% forêt résineuse productive
Centre-ouest	1970-1980	31J03SE_31G14NE_1	158	143	8,2	0,005	53,9	42,5	3,7
		31J05NO_NE_1	162	137	10,7	0,3	58,1	34,1	7,8
		31O04SE_31J13NE_1	162	137	8,0	0,0	31,9	47,8	20,3
		31O04SE_31O03SO_31J13NE_31J14NO_1	161	144	8,9	0,0	41,4	53,5	5,1
	2000-2009	31J02NE_SE_31J01SO_NO_2	163	132	4,4	1,2	56,2	33,8	9,9
		31J07NO_NE_2_CO	162	140	6,0	0,6	51,9	40,1	7,9
		31J04NE_4	166	154	4,7	0,7	55,5	38,8	5,7
		31K09SO_4	160	146	6,4	0,0	57,5	35,0	7,5
		31L10NO_1	157	133	14,1	0,0	29,9	66,4	3,7
		31L07NE_NO_1	158	142	12,0	0,0	32,1	55,9	12,1
Ouest	1926-1936	31M02NE_SE_1	159	127	17,7	0,0	29,1	53,5	17,4
		31K05NO_NE_1	161	132	5,2	0,0	33,3	52,3	14,4

Tableau 2.3 (Suite)

Sous-régions	Périodes	Paysages échantillons (réfère au No. de feuillet des cartes topographiques)	Aire total (km ²)	Aire forestière productive (km ²)	Aire aquatique et espace inondé (%)	Aire alloué à l'agriculture (%)	% forêt feuillue productive	% forêt mixte productive	% forêt résineuse productive
Ouest	1945-1955	31L14NE_2	160	126	17,7	0,0	5,7	60,7	33,6
		31M01SE_2	166	152	4,2	0,0	12,6	67,6	19,8
		31K15NE_31K16NO_2	164	130	17,0	0,0	33,1	48,8	18,1
1970-1980		31L09SO_SE_2	163	137	13,1	0,0	31,9	56,7	11,4
		31L10NO_1	157	133	14,1	0,0	29,9	66,4	3,7
		31L07NE_NO_1	158	142	12,0	0,0	32,1	55,9	12,1
		31M02NE_SE_1	159	127	17,7	0,0	29,1	53,5	17,4
		31K05NO_NE_1	161	132	5,2	0,0	33,3	52,3	14,4
2000-2009		31L14NE_NO_SE_4	164	151	11,0	0,0	8,9	61,4	29,7
		31M01NO_4	161	142	9,4	0,0	18,6	65,1	16,2
		31K15SE_31K10NE_4	163	149	6,3	0,0	36,3	50,2	13,5
		31L09NE_SE_4	161	135	12,9	0,0	28,8	58,7	12,6

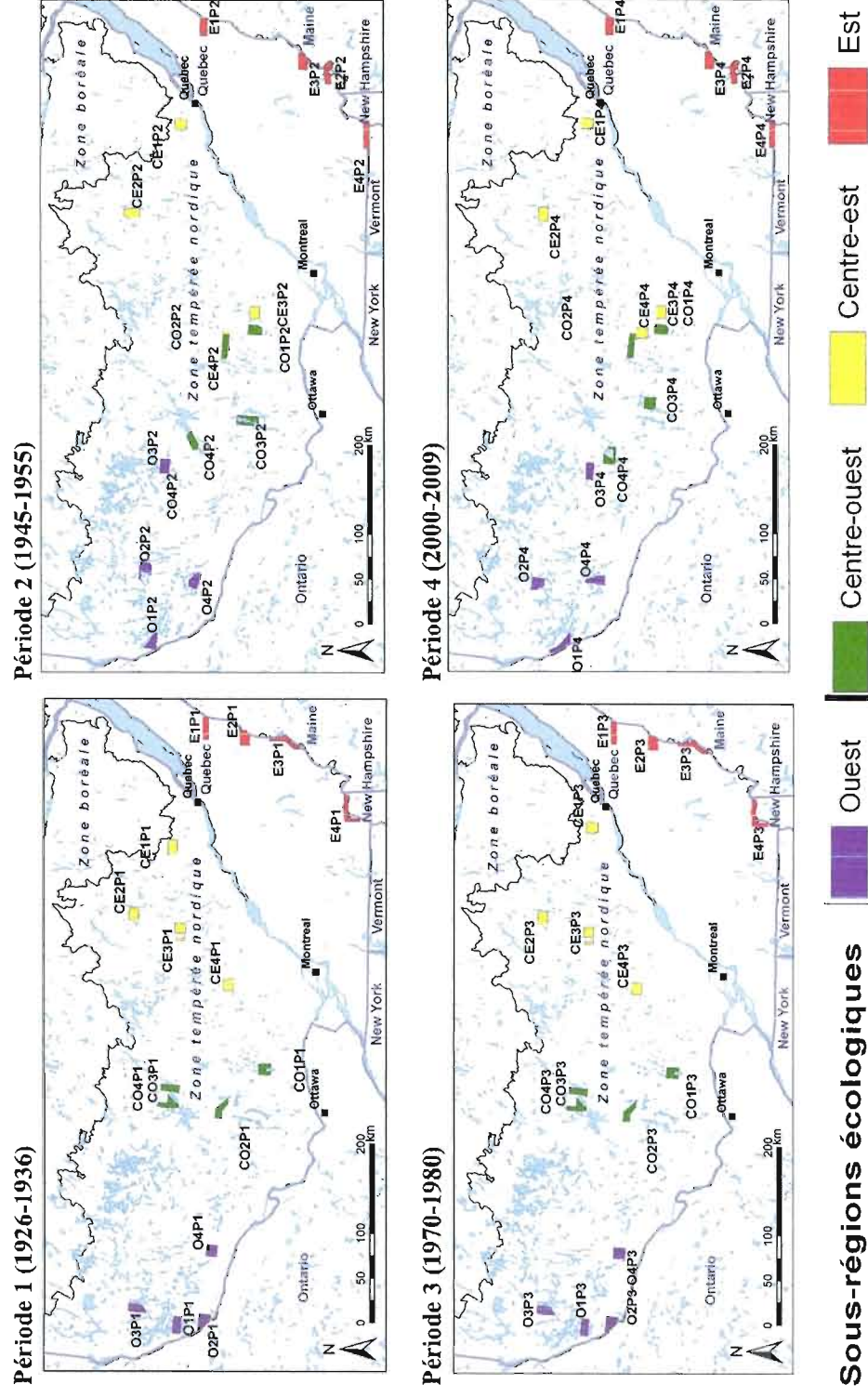


Figure 2.2 Cartes des paysages échantillons pour chacune des périodes

2.2. Volet caractérisation du régime de perturbations par le chablis

2.2.1. Méthodes

Trois sources d'information ont été utilisées afin d'identifier les chablis par paysage échantillon et par période. Celles-ci sont les photos aériennes, les cartes écoforestières du 4^e décennal et la base de données SIFORT. La photo-interprétation à partir de photos aériennes anciennes et récentes a été effectuée pour 4 périodes, soit 1926-1936, 1945-1955, 1970-1980 et 2000-2009. La première période débute en 1926, année des premières photos aériennes disponibles. Une période de 20 ans existe entre les 4 périodes étant donné qu'on estime la période de détectabilité à une quinzaine d'année. Comme l'intérêt réside dans la détection des chablis durant le dernier siècle, il n'est pas nécessaire d'avoir une analyse en période continue. Les photos proviennent de la Photothèque nationale de l'Air à Ottawa, la Géomathèque du Québec et de la cartotheque de l'UQAM. La dimension de chaque photographie est de 20 x 25 cm et leur échelle moyenne de 1 : 15 000 (1 : 8000 à 1 : 21 000). L'interprétation des photos aériennes a été effectuée à l'aide d'un stéréoscope à miroir (dispositif optique, modèle M527, SOKKIA). Grâce à la stéréoscopie, il était possible de mieux identifier les chablis par les changements de hauteur que ceux-ci produisent dans le couvert forestier. La délimitation des chablis détectés sur les photos aériennes a été reportée sur acétate. Pour chaque chablis identifié, l'âge de régénération, le type de peuplement affecté (résineux, feuillu, mixte), la sévérité (partielle, totale) ainsi que la direction dans laquelle les arbres sont tombés lors de l'événement ont été notés. Ce dernier critère se veut être un indicateur de la direction dominante des vents lors de l'événement qui a provoqué le chablis. Les photographies avec chablis ont par la suite été numérisées en format TIFF (Tagged image file format) à l'aide d'un numériseur de 17 pouces par 11 pouces de type "flatbed" (Epson expression, 10 000 xl) et d'une imprimante (Epson stylus CX3810) pouvant effectuer des numérisations. Par la suite, les photos aériennes ont été ortho-rectifiées dans un SIG (système d'information géographique) ce qui a permis de caler géographiquement et topologiquement les photos aériennes dans l'espace du territoire à l'étude. Par la suite, les polygones des chablis délimités sur photo aérienne ont été numérisés dans l'environnement du SIG (Arc Gis version 9.2), permettant de calculer leur superficie.

Les chablis des années 1970-1980 ont été identifiés directement à partir de la base de données SIFORT premier décennal (provenant du MRNF) et ceux de 2000-2009, à partir des feuillets écoforestiers du quatrième décennal.

La base de données géoréférencée SIFORT «est un système hybride des modes vectoriel et matriciel» (Gouvernement du Québec - Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2011a). Ces données sont issues des cartes et d'informations provenant des premier, deuxième et troisième inventaires forestiers décennaux réalisés par le Ministère. Les aires perturbées par le chablis obtenues à partir de SIFORT ont été répertoriées à l'aide de la sélection de tesselles (14 hectares) avec chablis (appellation CH). Celles obtenues à partir des cartes écoforestières ont été répertoriées à l'aide de la sélection CHT (chablis total) et CHP (chablis partiel). Ces outils nous ont aidés à retracer rapidement les événements de chablis qui ont été par la suite photo-interprété selon les mêmes étapes subséquentes que celles effectuées pour les photos aériennes anciennes (photo-interprétation, numérisation des photos, ortho-rectification et numérisation avec Arc Gis). Afin d'atteindre les différents objectifs de travail ainsi que de vérifier les hypothèses, des variables ont été choisies en fonction de ceux-ci. L'ensemble des variables considérées est présenté dans le Tableau 2.4.

Tableau 2.4 Description des variables dépendantes et indépendantes (volet chablis)

Variables	Noms	Nature	Description
Sévérité (partielle et totale)	SEVPARTIELLE SEVTOTALE	Qualitative binaire, dépendante, ordinale	Proportion d'arbres renversés. Totale ($\geq 75\%$), partielle ($\geq 25-74\%$)
Sous-régions	SRE SRCE SRCO SRO	Qualitative multiple non ordonnée, indépendante, nominale	Sous-régions de l'Est, Centre-est, Centre-ouest et de l'Ouest
Classe de taille des chablis	CTAILLE	Semi-quantitative, dépendante	0 < 5 ha, 5 > 25 ha, 25 > 49 ha, 50 > 100, ≥ 100 ha
Périodes	P1 P2 P3 P4	Semi-quantitative, indépendante	4 décennies à intervalle de 20 ans (périodes 1926-1936, 1945-1955, 1970-1980, 2000-2009)
Superficie des chablis	SUPERFICIE	Quantitative continue, dépendante	Superficie des chablis en hectare

L'âge des chablis et l'année d'origine de la perturbation ont été estimés à partir d'une estimation de l'âge de régénération après perturbation par chablis et l'année des photos concernée. L'âge des chablis partiels et totaux a été estimé visuellement à partir de la hauteur des plus grands arbres correspondant à la régénération observée à l'intérieur de la perturbation. L'âge de régénération a été estimé à partir de la hauteur des arbres et un taux approximatif de croissance (21,34 cm/année pour *Acer rubrum* et 30,18 cm/année pour le *Populus grandidentata*) (Palik et Pregitzer, 1992). Toutefois, cette estimation demeure approximative.

Afin d'évaluer le type de peuplement (feuillu ou résineux) affecté lors des chablis, nous avons assumé que le peuplement au pourtour des chablis totaux ainsi que les arbres résiduels situés à l'intérieur des chablis partiels devaient appartenir au même type de peuplement que ceux qui ont subi la perturbation. Les teintes, les textures, les formes des couronnes lors de la photo-interprétation nous ont permis de déterminer le type de peuplement.

2.2.2. Évaluation de la sévérité des chablis

Préparation des données

Nous avons utilisé deux classes de sévérité : totale ou partielle. La proportion d'arbres renversés dans le couvert forestier permet de déterminer la sévérité de ces événements. Une proportion d'arbres renversés au sol causant une ouverture du couvert forestier de $\geq 75\%$, peu importe la superficie de l'ouverture, est définie comme une perturbation sévère et considérée comme étant un événement de chablis total. Celles causant des ouvertures du couvert forestier de $\geq 25\%$ et $< 75\%$ sont définies comme des perturbations modérées et légères et considérées comme étant des événements de chablis partiel. Au-dessous de ce pourcentage, la détection devient difficile puisque nous observerons une fermeture de la canopée. Les trouées dans le couvert forestier peuvent parfois être dues à des causes autres que le chablis telles que la sénescence, les insectes, les pathogènes, la glace. Pour s'assurer que les trouées résultent de chablis, la direction des arbres tombés au sol devait être dans la même direction sinon la possibilité de chablis était exclue.

Analyses

Une analyse de khi carré par permutation a été effectuée à l'aide du programme de statistique R (version 2.11.1, package Rcmdr, tcltk, RODBC et car) afin de vérifier l'homogénéité des sévérités des événements de chablis entre les différentes sous-régions et périodes. Elle a permis de mesurer la liaison entre deux variables qualitatives (sous-régions et sévérité). Ce test a été choisi, car l'une des conditions d'applications (la loi de Cochran) n'a pas été respectée lors de l'essai d'un khi carré dans le logiciel de statistique JMP (version 9). De plus lorsque n (comme dans ce cas-ci ; $n=8$) est faible, il est suggéré de faire la correction de Williams ou de réaliser un test par permutation (Scherrer, 2007). Nous avons donc utilisé la méthode par permutation en effectuant 1000 ré-échantillonnages nous permettant de calculer les intervalles de confiance des proportions et ainsi comparer les sous-régions et les périodes entre elles (Équation 1).

Équation 1

Intervalle de confiance = $\pm t \sqrt{\frac{P(1-P)}{N}}$ où $t = t$ de Student, P = proportion et N = taille de l'échantillon.

2.2.3. Superficie forestière affectée par le chablis

Analyses

Une analyse de variance (anova) à un critère de classification a été utilisée afin de tester la différence de superficies des taches de chablis partiels, totaux et combinés (partiels et totaux) entre les différentes sous-régions (toutes périodes comprises). Le logiciel JMP (version 9) a été utilisé. Les analyses statistiques ont été effectuées sur des données transformées en log afin d'obtenir une distribution normale de la superficie (chablis partiels, chablis totaux, chablis partiels et totaux) (test statistique de Shapiro-Wilks, Prob<W = 0,9347, 0,6500 et 0,1636). Cette transformation a permis aussi de corriger l'homoscédasticité des erreurs résiduelles et d'obtenir des données homoscédastes.

2.2.4. Distribution de fréquence des classes de tailles des chablis

Préparation des données

Nous avons testé si la distribution des chablis par classes de tailles était différente entre les régions et les périodes. Les classes de tailles utilisées sont : 0-5, 5-25, 25-50, 50-100 et 100-1000 hectares.

Analyses

Pour ce faire, une analyse statistique de khi carré par permutation a été effectuée à l'aide du programme de statistique R (version 2.11.1, package Rcmdr, tcltk, RODBC et car).

2.2.5. Intervalle de retour des chablis

Préparation des données

L'intervalle de retour est un élément important permettant d'obtenir le patron de récurrence des chablis. Pour effectuer le calcul, il est nécessaire d'obtenir la superficie du territoire forestier pouvant être perturbé par le chablis, la superficie perturbée par chablis et la période de détection de chablis. La superficie du territoire forestier pouvant être perturbée a été obtenue à l'aide des cartes écoforestières du 4^e décennal (annexe 2). Les zones aquatiques (lacs, rivières étangs et ruisseaux), les zones inondées, les aulnaies, les gravières, les milieux perturbés par l'activité humaine (raison récréative, coupes privées ou autres, etc.), les zones dénudées et semi-dénudées humides et sèches, les routes et autoroutes, les lignes de transport d'énergie ainsi que les terres agricoles et les terrains agricoles localisés dans les secteurs agroforestiers ont été exclues (Gouvernement du Québec - Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, 2011b). Pour comparer les sous-régions entre-elles, nous avons additionné les valeurs de l'aire totale (en km²) de chacun des paysages échantillons afin d'obtenir une seule valeur par sous-région. La même procédure a été effectuée pour les valeurs des aires forestières pouvant être perturbées par le chablis. La superficie perturbée pour chacune des sous-régions par période de temps a été obtenue en additionnant la superficie en hectare des chablis observés à l'intérieur des quatre paysages échantillons de chaque sous-région. La période de détection de chablis a été estimée à 15 ans. Nous avons fait ce choix puisque les chablis observés sur photos aériennes dans cette étude ne dépassent pas 15 ans. Ceci signifie qu'aucun chablis de plus de 15 ans n'a pu être identifié comme une perturbation par chablis lors de la photo-interprétation. Cette estimation a été validée à l'aide de chablis dont on connaît la date d'origine.

$$\text{Intervalle de retour} = \frac{\text{Superficie du territoire forestier pouvant être affectée par le chablis}}{\text{Superficie perturbée}} \times \text{Période de perception de chablis}$$

Tirée de Zhang et al., 1999

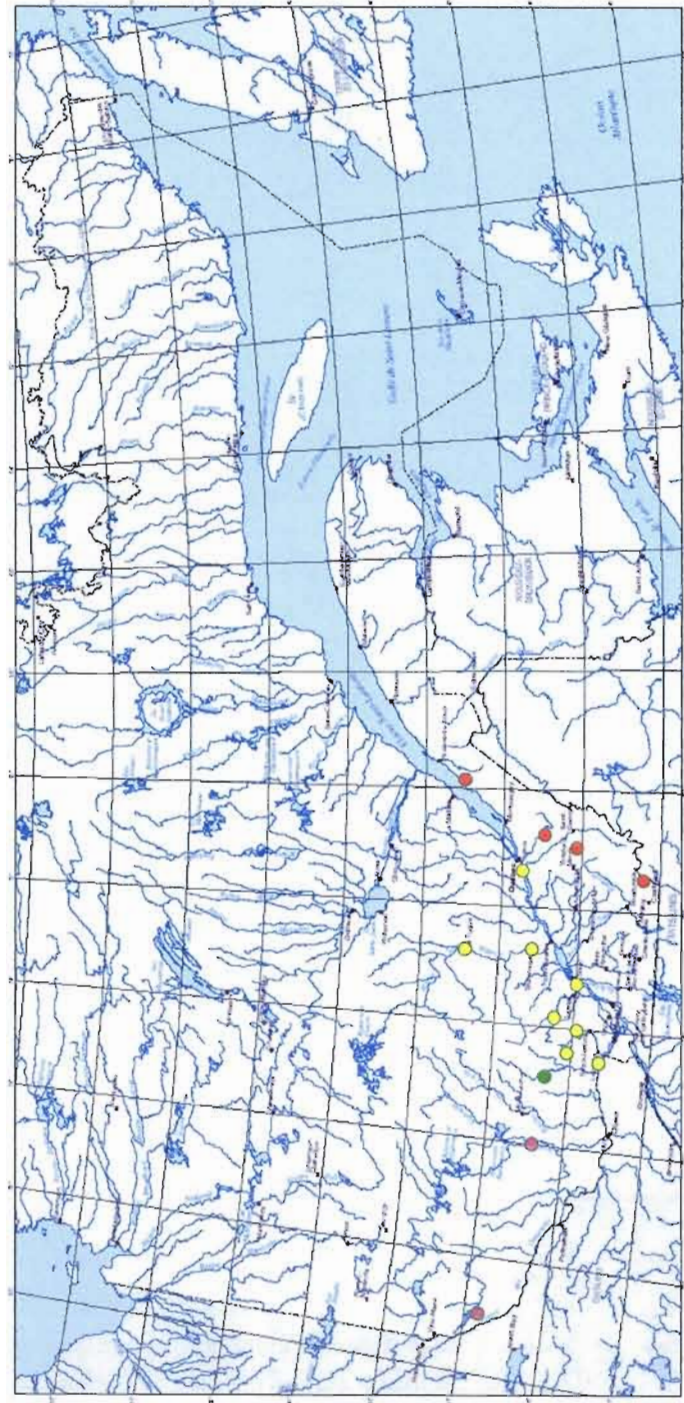
Analyses

Une ANOVA à deux critères de classification (sous-régions, périodes) aurait dû être effectuée sur les résultats d'intervalle de retour obtenus. Étant donné l'absence d'observation de chablis dans certaines sous-régions écologiques et pour certaines périodes, il nous a donc été impossible de tester statistiquement les résultats. Les résultats concernant cette section seront discutés en fonction des patrons observés.

2.3. Volet caractérisation du régime des vents extrêmes

2.3.1. Méthodes

Le régime de vents extrêmes a été caractérisé à partir des archives météorologiques qui proviennent d'Environnement Canada (archives nationales d'information et de données climatiques). Pour ce faire, nous avons extrait les données des vitesses maximales des vents horaires (journaliers), les vitesses de rafales maximales journalières ainsi que les directions des vents, et cela provenant de plusieurs stations localisées dans nos 4 sous-régions. Au total, nous avons extrait des données de 17 stations météorologiques (vitesse des vents horaires) et 15 stations (rafales maximales journalières) (Figure 2.3 et annexe 2). Les données de vitesse des vents étant très rares, voir absentes de plusieurs stations d'observations pour les années 1930 à 1950, nous nous sommes limités aux années comprises entre 1960-2009 inclusivement (étendue temporelle de 49 ans). L'extraction des données climatiques a été effectuée pour les mois de mai à octobre inclusivement étant donné que nous croyons que le risque de chablis est plus important lorsque le couvert forestier est à son maximum durant la période de feuillaison en forêt feuillue décidue. Seule la valeur maximale des vents par jour pour les années et saisons (printemps, été, automne) a été utilisée. Afin d'atteindre les différents objectifs de travail ainsi que de vérifier les hypothèses, des variables ont été choisies en fonction de ceux-ci. L'ensemble des variables considérées est présenté dans le Tableau 2.5.



Sous-région écologiques

- Est (Sherbrooke, Thetford Mines, Beauceville, La Pocatière)
- Centre-est (l'Assomption, Québec/Jean Lesage Intl A, Rawdon, St-Lin-Laurentides, Shawinigan, Ste-Agathe des Monts, La Tuque, Chatham-Brownsburg)
- Centre-ouest (St-Jovite)
- Ouest (Maniwaki UA et airport, barrage Témiskamingue)

Figure 2.3 Carte de l'emplacement des stations météorologiques

Tableau 2.5 Description des variables dépendantes et indépendantes (volet vents extrêmes)

Variables	Noms	Nature	Description
Sous-régions	SRE SRCE SRCO SRO	Qualitative multiple non ordonnée, indépendante, nominale	Sous-régions de l'Est, Centre-est, Centre-ouest et de l'Ouest
Vitesse des vents	HVITESSEVENT RVITESSEVENT	Quantitative continue, dépendante	Valeurs maximales des données horaires et des rafales en (m/s)/jour.
Direction des vents	DIRECTIONVENT	Qualitative multiple non ordonnée, dépendante	Direction des vents (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW).
Périodes	P1 P2 P3 P4	Semi-quantitative, indépendante	4 décennies à intervalle de 20 ans (périodes 1926-1936, 1945-1955, 1970- 1980, 2000-2009)
Années	ANNEE	Semi-quantitative, indépendante	Années comprises dans l'une des périodes

2.3.2. Distribution généralisée des valeurs extrêmes

Préparation des données

Pour chaque sous-région, nous avons évalué les paramètres de la distribution de fréquence des vitesses des vents maximaux journaliers et des rafales maximales journalières en utilisant la distribution généralisée des valeurs extrêmes (GEV). La distribution généralisée des valeurs extrêmes fait partie de la famille des distributions de probabilité continue développée dans la théorie de valeur extrême pour combiner les familles de Gumbel, de Fréchet et de Weibull également connus sous le nom de type I, II et III des distributions de valeur extrême. Cette distribution a été utilisée étant donné notre intérêt pour les valeurs extrêmes. La distribution de GEV, proposée par Jenkinson (1955) est la distribution de limite des maximums correctement normalisés d'un ordre d'indépendant et de variables aléatoires

identiquement distribuées. Pour cette raison, la distribution de GEV est employée comme approximation pour modéliser les maximums de longs ordres (finis) des variables aléatoires. Pour cette étude, les paramètres de GEV sont estimés à l'aide de la méthode des *L-moments* (Hosking, 1990). La distribution généralisée de valeur extrême est une fonction de répartition cumulative. Pour $1 + \xi(x - \mu) / \sigma > 0$, où $\mu \in \mathbb{R}$ est le paramètre de location (μ), $\sigma > 0$ le paramètre de l'échelle (σ) et $\xi \in \mathbb{R}$ le paramètre de la forme (k) qui gouverne la queue de la distribution (Coles, 2001).

$$F(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right]^{-1/\xi} \right\}$$

Analyses

L'estimation de ces paramètres de la distribution généralisée des valeurs extrêmes (GEV) pour chacune des sous-régions écologiques (Est, Centre-est, Centre-ouest, Ouest) a été effectuée par bootstraps non paramétriques à partir des données empiriques. La méthode par bootstrap non paramétrique est basée sur de « nouveaux échantillons » obtenus par tirage avec remise à partir de l'échantillon initial. Cela consiste à attribuer la probabilité $1/n$ à chacun des n nombres dans un échantillon. La méthode a nécessité des échantillons simulés au nombre de 1000 (données de vitesse des vents maximaux journaliers) et de 400 (données de rafales maximales journalières) afin de s'assurer la convergence des estimations. Cette technique est très utile lors de l'analyse de données rares comme les vents extrêmes. Cette analyse a été effectuée à l'aide du programme R (Version 2.11.1, package *rcmdr* et *isnev*).

Le bootstrapping a permis aussi d'évaluer la moyenne et les intervalles de confiance de chacun de ces paramètres afin de comparer les distributions de fréquences de la vitesse des vents extrêmes entre les différentes sous-régions.

2.3.3. Probabilité des vents modérés à extrêmes

Préparation des données

Les valeurs extrêmes requièrent une analyse de l'estimation de la probabilité des événements qui sont plus extrêmes que celles qui ont été observées (Coles, 2001). Ces probabilités nous renseignent sur le risque de perturbation par chablis qui pourrait survenir dans le domaine de l'érablière à bouleau jaune. Dans le but de travailler uniquement avec des valeurs de vitesse de vent pouvant affecter la canopée, des seuils de vitesse des vents ont été établis (Tableau 2.6) à partir de l'information contenue dans la littérature (Péguy, 1970; Besson et al., 1996; Boubaker et Fehri, 2009; Environnement Canada, 2010b).

Tableau 2.6 Seuil de la vitesse des vents et rafales

	Seuil vitesse des vents maximaux journaliers	Seuil vitesse des rafales maximales journalières
Vent modéré	7 m/s	12 m/s
Vent fort	15 m/s	20 m/s
Vent extrême	23 m/s	28 m/s

Analyses

Les probabilités d'obtenir des vents supérieurs à un seuil prédéterminé ($P(X > X_1)$) ont été calculées par le programme Easyfit (version 5.4, Mathwave, www.mathwave.com). Celui-ci est une application d'analyse et de simulation de données qui permet d'adapter des distributions de probabilité de valeurs extrêmes et d'aider à la sélection des meilleurs modèles de distribution de fréquences. Ce programme utilise la méthode des *L-moments* introduite par Hosking (1990). Cette méthode est l'équivalent de la méthode des moments de probabilité pondérés. Nous nous sommes servis de ce programme pour calculer les paramètres de la GEV (tout comme nous l'avons fait avec R) pour chaque sous-région et avons utilisé la fonction de distribution cumulative (Équation 2) pour évaluer les probabilités d'obtenir des vitesses de vents supérieures à un certain seuil (Équation 3) :

(Équation 2)

Fonction de distribution cumulative : $F(x) = \begin{cases} \exp(-(1 + kz)^{-1/k}) & k \neq 0 \\ \exp(-\exp(-z)) & k = 0 \end{cases}$ où

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

(Équation 3)

Probabilité que la vitesse des vents soit $> x = 1 - F(x)$

Les courbes de probabilités obtenues par sous-régions ont été comparées visuellement pour les vitesses des vents maximaux journaliers et les rafales maximales journalières.

2.3.4. Vitesse des vents et des rafales maximales (comparaison entre périodes)

Préparation des données

Les vitesses des vents peuvent changer au cours du temps pouvant ainsi influencer sur le nombre et la sévérité des événements de chablis. Pour vérifier ceci, nous avons choisi des périodes pour les données de vitesse des vents maximaux journaliers et de rafales maximales journalières (Tableau 2.7). Étant donné le manque de données climatiques pour certaines sous-régions, la comparaison des vitesses des vents entre les quatre sous-régions n'a pu être possible qu'avec les données débutant en 1994. Afin d'obtenir une meilleure idée de l'évolution de la vitesse des vents et des rafales dans le temps, les analyses ont été effectuées sur des périodes ayant le plus grand intervalle de temps possible entre elles.

Tableau 2.7 Comparaison des vitesses des vents et des rafales pour différentes périodes

Données climatiques	Comparaison des sous-régions écologiques de l'érablière à bouleau jaune	Périodes de comparaison
Vitesse des vents maximaux journaliers	Est et Ouest	1962 à 1966 et 2005 à 2009
	Est, Centre-est, Centre-ouest et Ouest	1994 à 1998 et 2005-2009
Vitesse des rafales maximales journalières	Est, Centre-est, Centre-ouest et Ouest	1994 à 1998 et 2005 à 2009

Analyses

Une analyse de variance à deux critères de classification avec et sans interaction a été choisie afin de vérifier s'il existe des différences dans les vitesses de vents modérés à extrêmes entre des périodes de temps pour chacune des sous-régions de l'érablière à bouleau jaune. Le logiciel JMP (Version 9) a été utilisé. La distribution de la variable dépendante a démontré une non-normalité même après transformation des données. Une analyse de variance par rang (Kruskal-Wallis) a donc été requise pour traiter les données.

2.3.5. Direction des vents

Préparation des données

Environnement Canada a présenté les données de direction des vents sous 36 points cardinaux correspondant à 360 degrés. Ceux-ci ont été réduits à 8 points cardinaux afin d'homogénéiser la base de donnée (Tableau 2.8).

Tableau 2.8 Points cardinaux attribués aux différents azimuts

Point cardinaux	Azimuts
Nord	34 à 36 et 1 à 2
Nord-est	3 à 6
Est	7 à 11
Sud-est	12 à 15
Sud	16 à 20
Sud-ouest	21 à 24
Ouest	25 à 29
Nord-ouest	30 à 33

Des diagrammes de roses des vents pour chacune des sous-régions écologiques ont été élaborés afin de voir la fréquence des directions des vents. De plus, afin d'obtenir les directions des vents lors des événements de chablis, des roses des vents ont été produites pour chacune des sous-régions écologiques à partir de la direction des arbres tombés dans les chablis photo-interprétés. Étant donné le nombre inégal de stations météorologiques ainsi que le nombre d'observations entre les différentes sous-régions, nous ferons l'interprétation des directions des vents visuellement ainsi qu'à l'aide d'un tableau de fréquence relative.

CHAPITRE III

3. RÉSULTATS

3.1. Volet chablis

3.1.1. Sévérité des chablis

À l'intérieur des paysages échantillons du domaine de l'érablière à bouleau jaune, on dénombre au total 56 taches de chablis totaux et 40 taches de chablis partiels réparties entre les quatre périodes à l'étude (Tableau 3.1).

Tableau 3.1 Nombre de taches de chablis partiel et total pour les différentes périodes

Périodes	Nombres de taches de chablis	
	Partiels	Totaux
1926-1936	3	5
1945-1955	3	4
1970-1980	6	5
2000-2009	28	42

Les sévérités (partielle et totale) des événements de chablis sont similaires entre les différentes périodes ($X^2=0,8919$, $p\text{-value} = 0,8521$).

Les tests statistiques par sous-région n'ont pu être effectués pour les périodes 1926-1936, 1945-1955 et 1970-1980 due à l'absence de chablis pour certaines de ces sous-régions. Mais néanmoins, on observe que les chablis sont très peu présents dans les sous-régions de l'Est (Est et Centre-est) et plus présents dans les sous-régions de l'Ouest (Centre-ouest et Ouest) (Figure 3.1). Durant la période 2000-2009, on observe cette même constatation mais en plus une croissance du nombre de taches de chablis d'est en ouest.

Durant cette période, il y a eu des chablis dans toutes les régions et les résultats démontrent une différence dans les sévérités des événements de chablis entre les sous-régions écologiques ($X^2=14,6635$, p-value = 0,000999). Il y a plus de chablis sévère dans la sous-région de l'Ouest que dans les autres sous-régions (Figure 3.1).

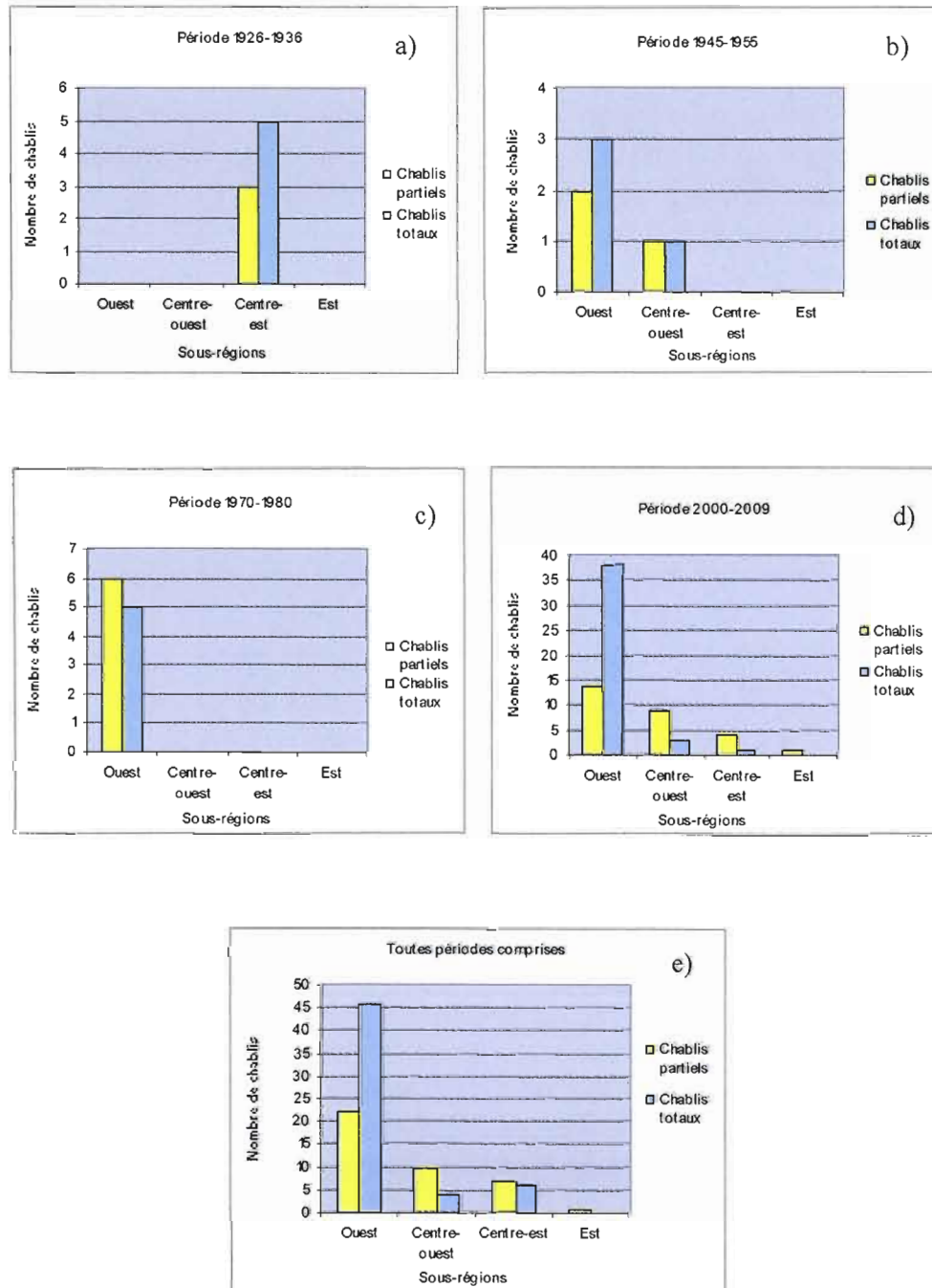


Figure 3.1 Nombre d'événements de chablis par classe de sévérité pour chacune des sous-régions écologiques de l'érablière à bouleau jaune par période

Il y a une différence dans les sévérités des événements de chablis entre les sous-régions écologiques pour la période 2000-2009 ($X^2=14,6635$, p-value = 0,000999) et toutes périodes comprises ($X^2=9,7223$, p-value = 0,008991). On note qu'il y a plus de chablis partiels dans la sous-région "Centre-ouest" que de chablis totaux. La distribution est inversée pour la sous-région "Ouest" où ce sont les chablis totaux qui compte un nombre plus élevé comparativement aux chablis partiels (Tableau 3.2, Figure 3.1e). On observe plus de deux fois plus de chablis partiel dans la sous-région "Ouest" que dans n'importe quelle autre sous-région et 8 fois plus de chablis total que dans d'autres sous-régions (Figure 3.1e). Toutefois, la sous-région du Centre-est démontre un large intervalle de confiance dû au nombre peu élevé de chablis. Ceci ne nous permet pas de distinguer les différences des sévérités des chablis de cette sous-région avec les autres. Ceci rend ce test statistique peu révélateur.

Tableau 3.2 Intervalles de confiance des fréquences de sévérité (partielle et totale) pour chacune des sous-régions écologiques pour la période 2000-2009 et toutes les périodes comprises

Sous-régions	Sévérité (période 2000-2009)			
	partielle		totale	
	P	intervalle	P	intervalle
Est	NA	NA	NA	NA
Centre-est	0,200	-0,369 - 0,769	0,800	0,231 - 1,369
Centre-ouest	0,250	-0,029 - 0,529	0,750	0,472 - 1,029
Ouest	0,731	0,608 - 0,854	0,269	0,146 - 0,392
Sévérité (toutes périodes comprises)				
	NA	NA	NA	NA
Centre-est	0,538	0,234 - 0,843	0,462	0,157 - 0,766
Centre-ouest	0,714	0,451 - 0,977	0,286	0,023 - 0,549
Ouest	0,324	0,210 - 0,437	0,676	0,563 - 0,790

NA : non applicable

3.1.2. Superficie affectée par sous-régions écologiques

Le nombre de tache de chablis augmente dans les sous-régions écologiques d'est en ouest. Celles ayant le plus de superficies affectées par le chablis sont en ordre décroissant : l'Ouest, le Centre-est, le Centre-ouest, et l'Est. On observe une différence marquée de la superficie totale de la sous-région "Ouest" comparativement aux autres sous-régions (Tableau 3.3).

Tableau 3.3 Nombre de taches de chablis (partiels et totaux combinés), moyenne des superficies et superficie totale affectée par sous-région, cumulées sur les quatre périodes

Sous-régions écologiques	Nombre de taches de chablis	Moyenne (ha)	Superficie totale (ha)
Est	1	17,20	17,20
Centre-est	13	5,10	66,32
Centre-ouest	14	3,83	53,55
Ouest	68	8,97	609,81

C'est dans les deux dernières périodes (1970-1980 et 2000-2009) que l'on retrouve les plus grandes superficies en hectares affectées par les événements de chablis (102,46 ha et 606,13 ha respectivement)(Figure 3.2 c et d). De plus, la distribution de la superficie totale entre les chablis partiels et totaux n'est pas la même entre les différentes sous-régions. On remarque une tendance similaire pour les sous-régions "Centre-ouest" et "Centre-est" mais une différence marquée entre les sous-régions "Ouest" et "Est" (Figure 3.2e). Cette différence est observée d'une part dans la proportion d'hectare affectée mais aussi dans le nombre plus élevé de chablis totaux que partiels présent dans la sous-région "Ouest" et de l'absence de chablis totaux dans la sous-région "Est".

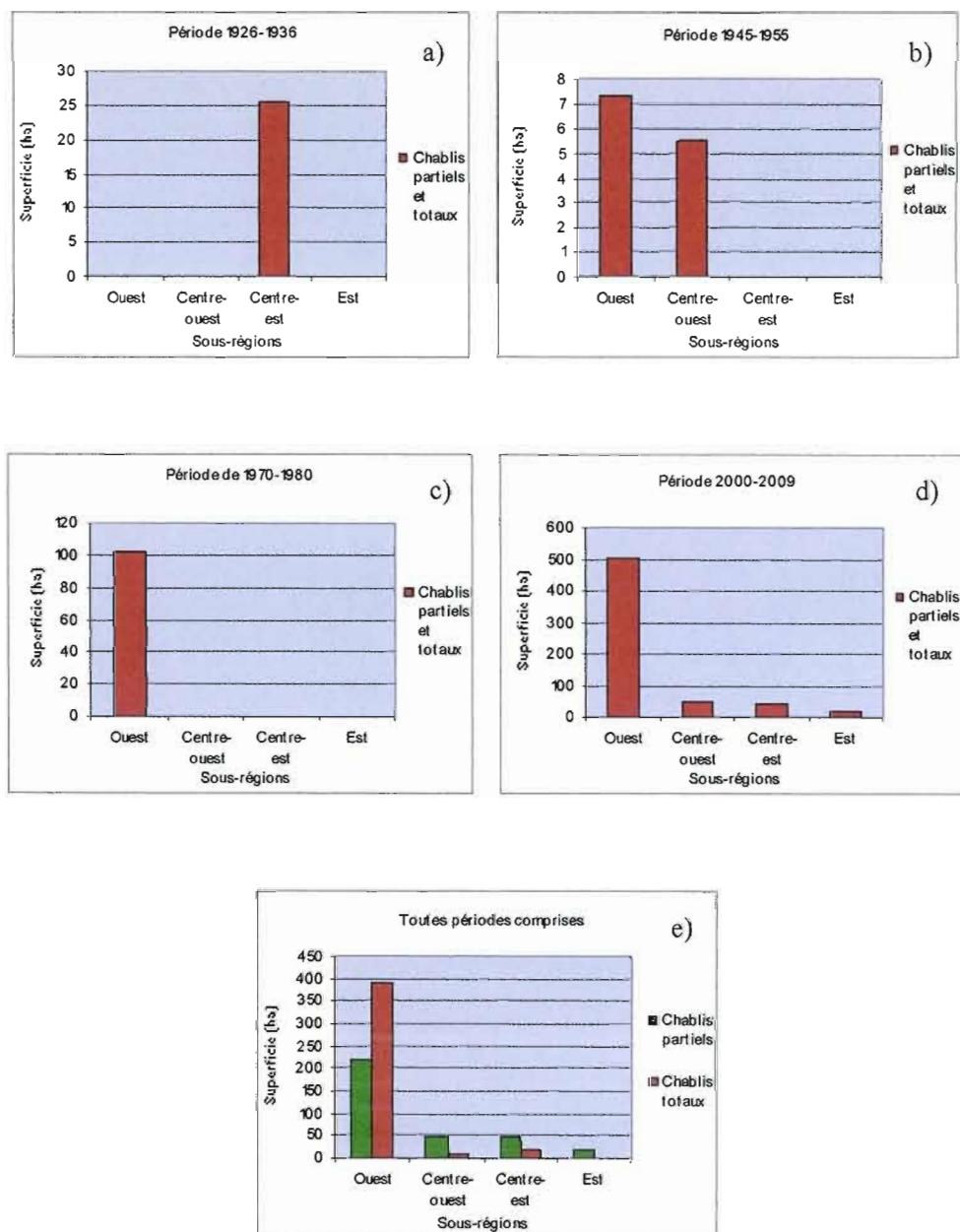


Figure 3.2 Superficie totale des événements de chablis par sous-région et par période

Les superficies des taches de chablis partiels (toutes périodes comprises) sont similaires entre les différentes sous-régions écologiques ($\text{Prob} > F = 0,2434$) (Figure 3.3a). Néanmoins, on

constate que la superficie affectée par les chablis partiels est plus importante dans la sous-région "Est".

Les superficies des taches de chablis totaux (toutes périodes comprises) sont similaires entre les différentes sous-régions écologiques ($\text{Prob} > F = 0,3074$) (Figure 3.3b). Il est à noter que nous n'avons que trois sous-régions dans cette analyse étant donné qu'aucun chablis total n'a été observé dans la sous-région de l'Est.

Les superficies des taches de chablis partiels et totaux combinés pour les différentes sous-régions écologiques (toutes périodes comprises) sont similaires entre les différentes sous-régions écologiques mais elles sont plus importantes dans la sous-région "Est" ($\text{Prob} > F = 0,1910$) (Figure 3.3c).

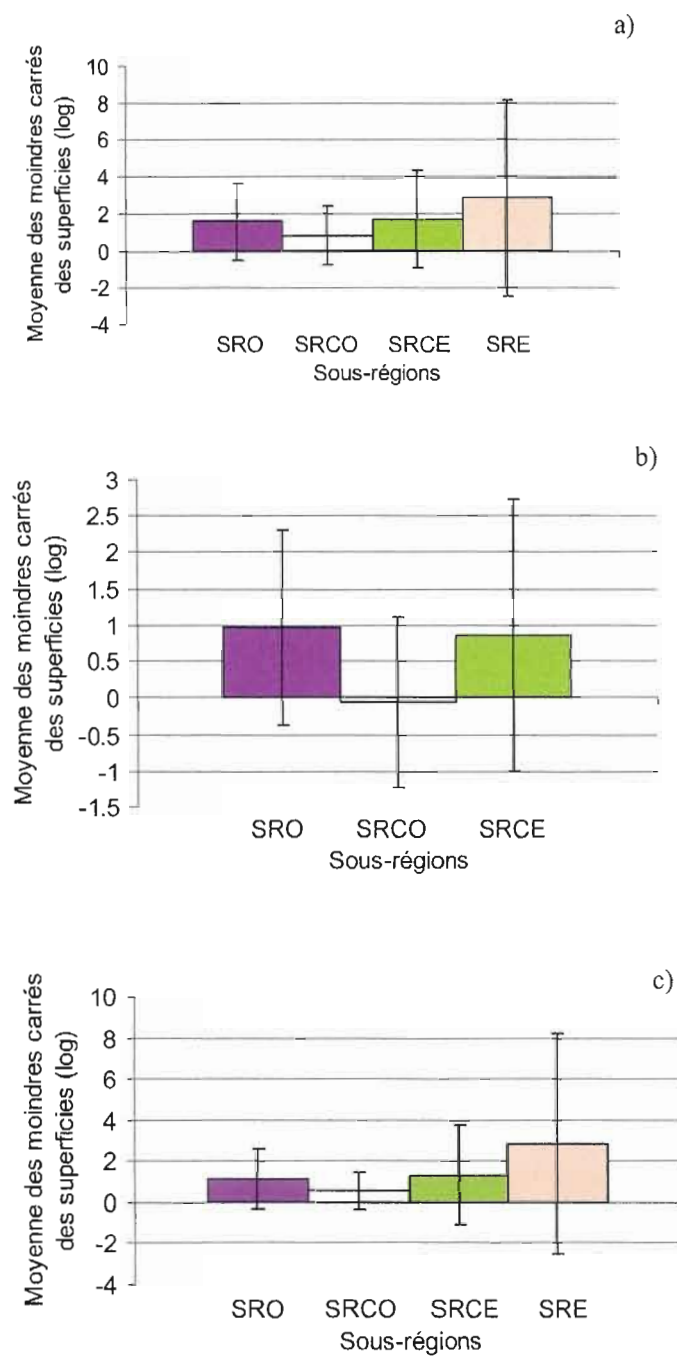


Figure 3.3 Moyennes des moindres carrés estimées (log) par le modèle de la superficie des taches de chablis partiel (a), total (b) et combinés (partiel et total) (c) par sous-région

3.1.3. Distribution des classes des tailles des chablis

Le nombre de chablis décroît de la plus petite classe de taille vers la plus grande (Figure 3.4). C'est dans les plus petites classes de taille que l'on retrouve le plus grand nombre (63) de taches de chablis. Cependant, c'est dans la classe de taille et 5-25 ha que l'on observe la plus grande superficie totale affectée par le chablis (290,09 hectares).

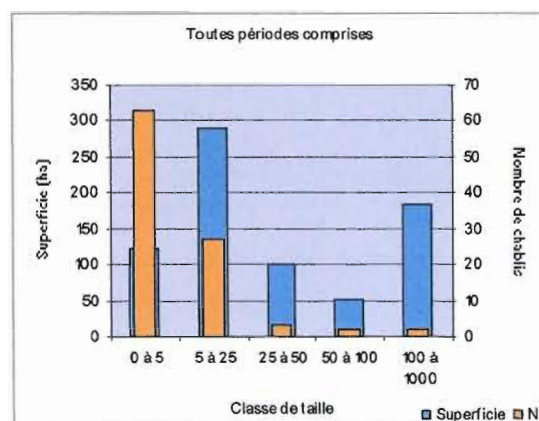


Figure 3.4 Nombre de chablis et somme des superficies par classe de taille

On observe une similitude dans la distribution de fréquence des classes de taille des événements de chablis entre les périodes ($\chi^2=15,5197$, p-value= 0,3437) et entre les sous-régions ($\chi^2=5,5422$, p-value= 0,7423) (Figure 3.5, Figure 3.6). Néanmoins, pour la dernière période, on observe une distribution de fréquence moins uniforme que pour les périodes précédents.

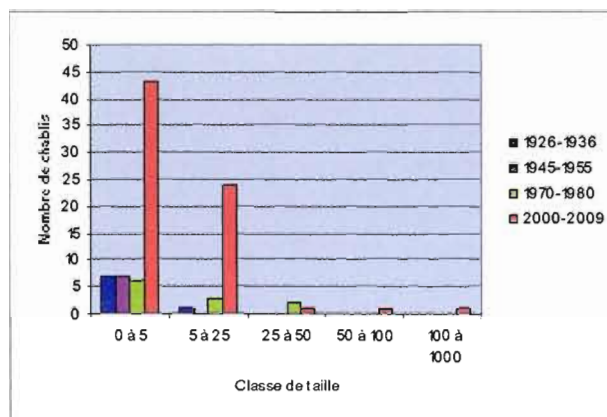


Figure 3.5 Nombre de chablis par classe de taille et par période

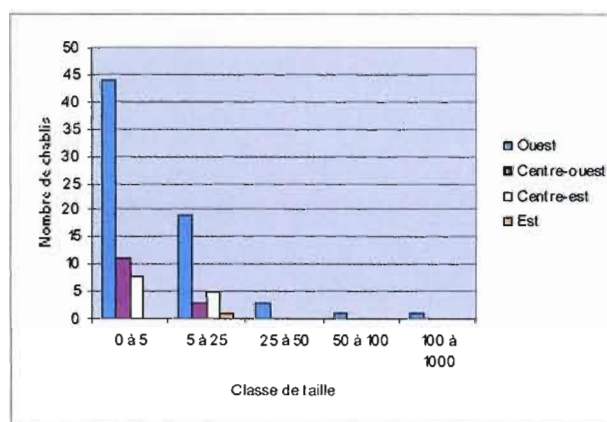


Figure 3.6 Nombre de chablis par classe de taille et par sous-région

3.1.4. Intervalle de retour

Les intervalles de retour estimés varient entre 1731 ans (SR=Ouest, période=2000-2009) et 152 182 ans (SR=Centre-ouest, Période=1945-1955). Lorsque toutes les périodes sont combinées, on observe un gradient d'intervalle de retour d'est en ouest (Tableau 3.4).

Tableau 3.4 Intervalle de retour par périodes et par sous-région écologiques

Périodes	Sous-régions			
	Ouest	Centre-ouest	Centre-est	Est
1926-1936	NA*	NA*	33 706	NA*
1945-1955	111 986	152 182	NA*	NA*
1970-1980	7822	NA*	NA*	NA*
2000-2009	1731	17 856	20 505	48 488
Toutes périodes comprises	5387	62 297	50 528	199 012

NA (non applicable) = 0

*: Plusieurs cases de contiennent pas de valeur dans le Tableau 3.4 cela est dû à l'absence de chablis dans certaines sous-régions pour certaines périodes.

On remarque pour la période 2000-2009 ainsi que la compilation de toutes les périodes (toutes périodes comprises) que les intervalles de retour augmentent d'ouest en est et qu'une grande différence sépare l'Ouest et l'Est. Les sous-régions du centre du domaine de l'érablière à bouleau jaune (centre-ouest et centre-est) ont des résultats assez semblables. Les intervalles pour la période 1945-1955 retrouvés dans l'Ouest et le Centre-ouest sont très élevés dus à de très petites superficies affectées par le chablis.

3.1.5. Direction des vents lors des évènements de chablis

D'après l'orientation des arbres tombés dans les chablis, dans le domaine de l'érablière à bouleau jaune, les vents provenaient du sud-ouest de façon générale pour les sous-régions "Est" et "Centre-ouest". Cependant, compte tenu du faible nombre de chablis ($n=1$, $n=8$) il est difficile de conclure à un patron de récurrence dans l'orientation. À l'intérieur de la sous-région "Centre-est", les vents provenaient de trois directions différentes soit du nord-ouest, nord-est et sud. Quant à la sous-région "Ouest", les vents provenaient de façon générale du sud-est (Figure 3.7).

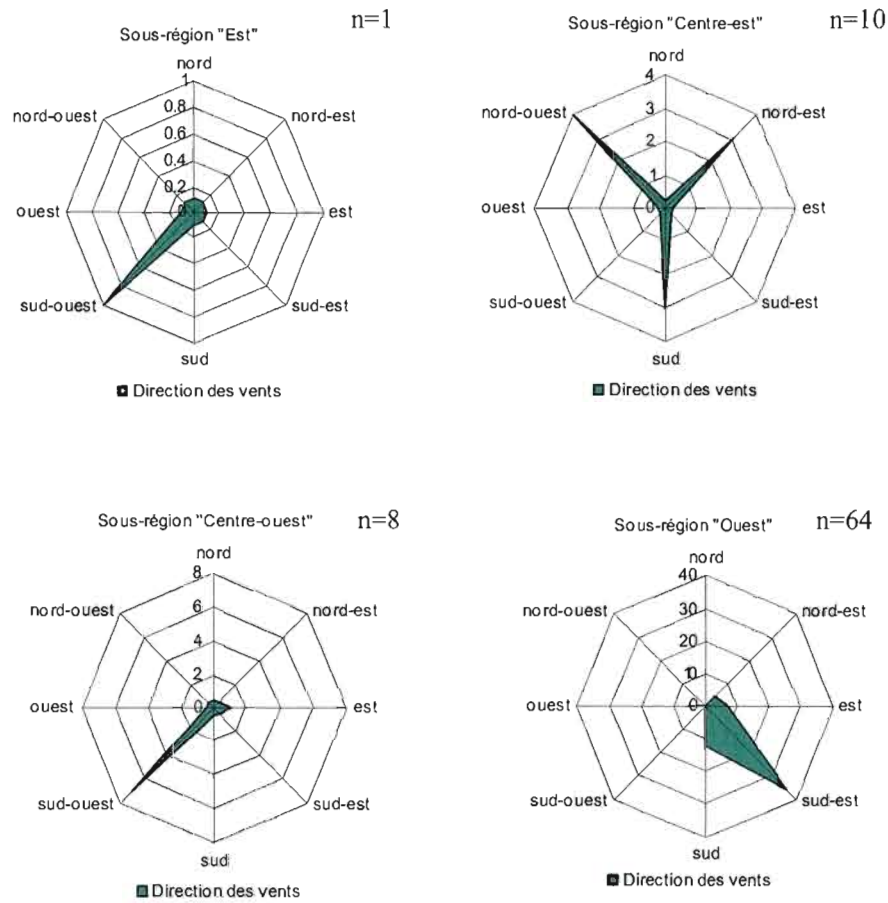
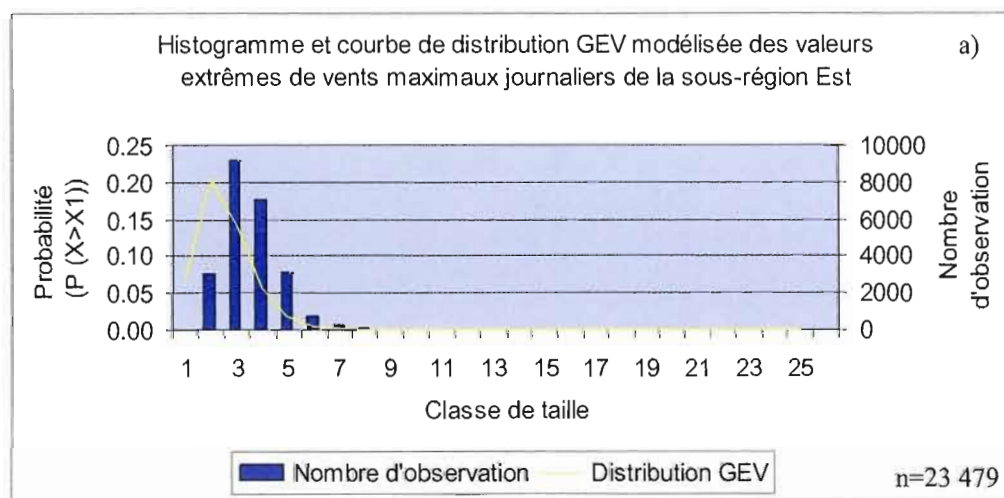


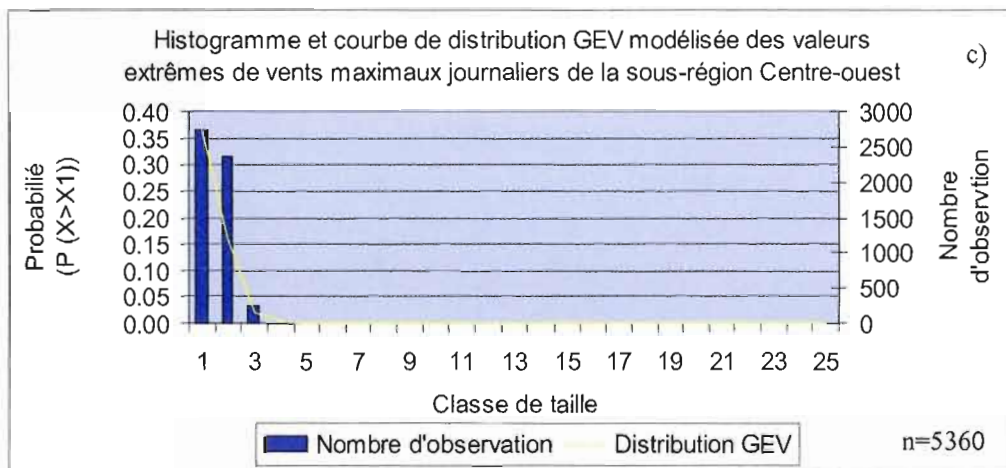
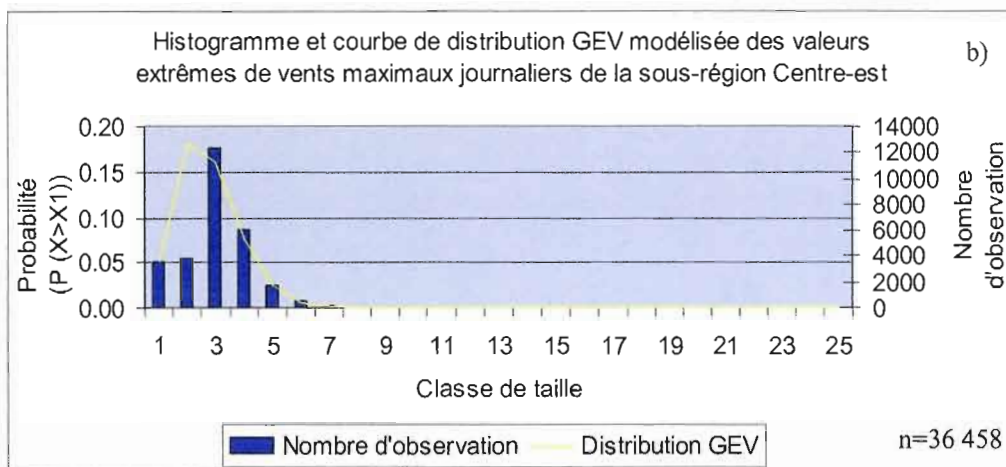
Figure 3.7 Diagramme de rose des vents des événements de chablis pour chacune des sous-régions écologiques

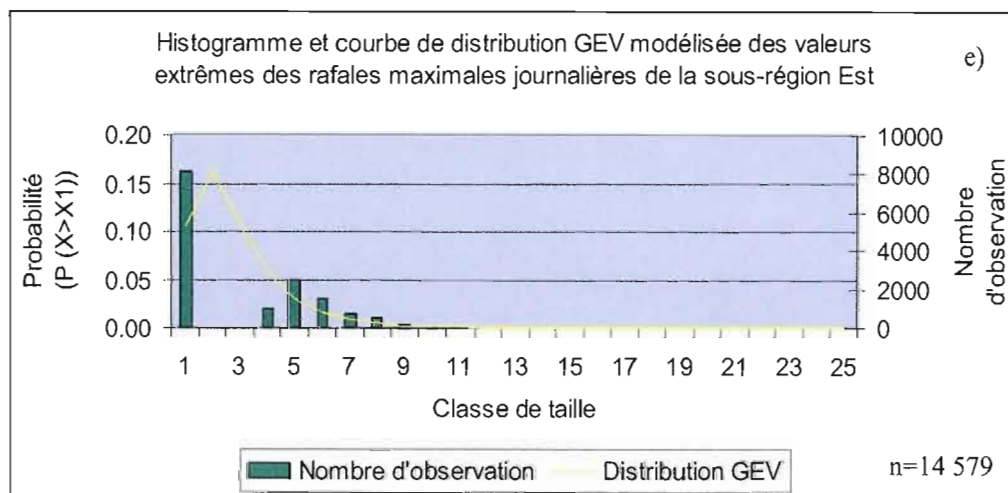
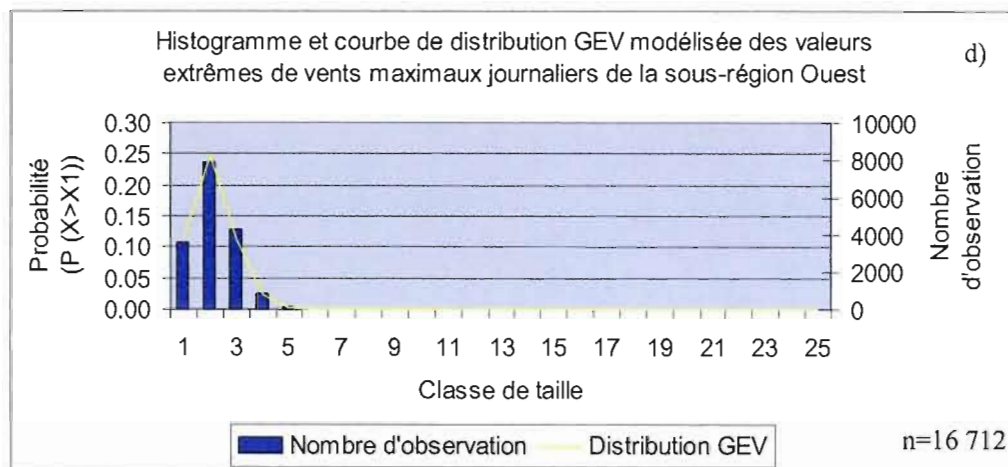
3.2. Volet vents extrêmes

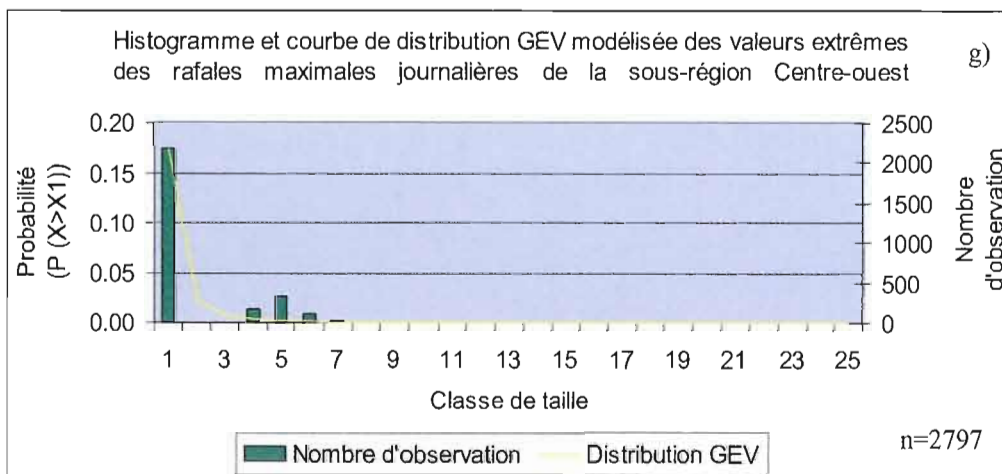
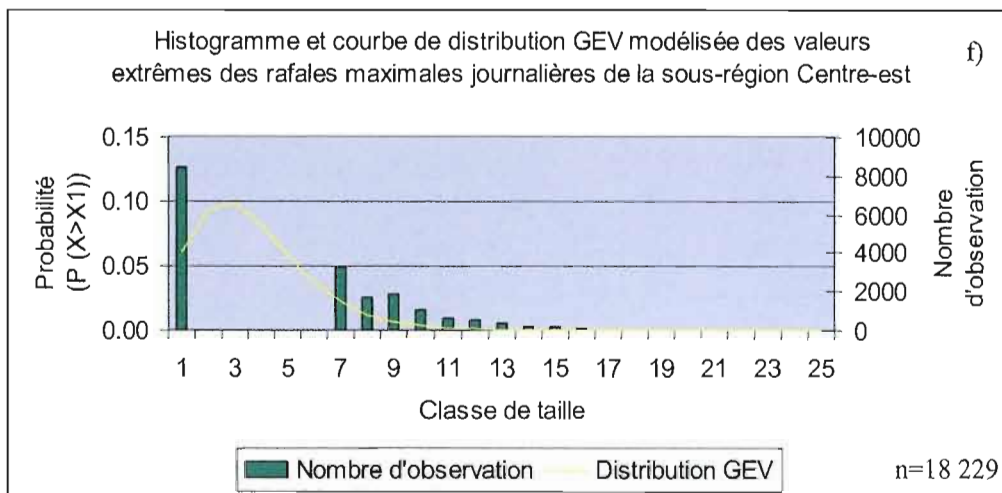
3.2.1. Distribution de fréquence de la vitesse des vents et des rafales

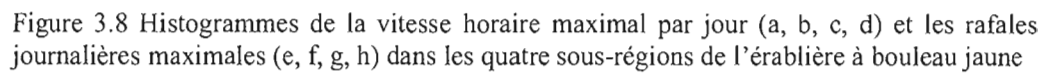
Tant pour les données de vitesse des vents maximaux journaliers que pour les rafales maximales journalières, on observe des distributions de fréquence dans la sous-région Centre-ouest légèrement différentes comparativement aux autres sous-régions (Figure 3.8; Figure 3.9). Ces différences sont dues au nombre peu élevé d'observations dans cette sous-région. Les vents les plus forts proviennent de la sous-région "Centre-est". À partir des histogrammes des vitesses des vents maximaux journaliers (excluant la sous-région Centre-ouest), les vitesses de vents les plus fréquentes sont entre 2 et 6 m/s (vents faibles) (mode de la distribution de fréquence)(Figure 3.8).











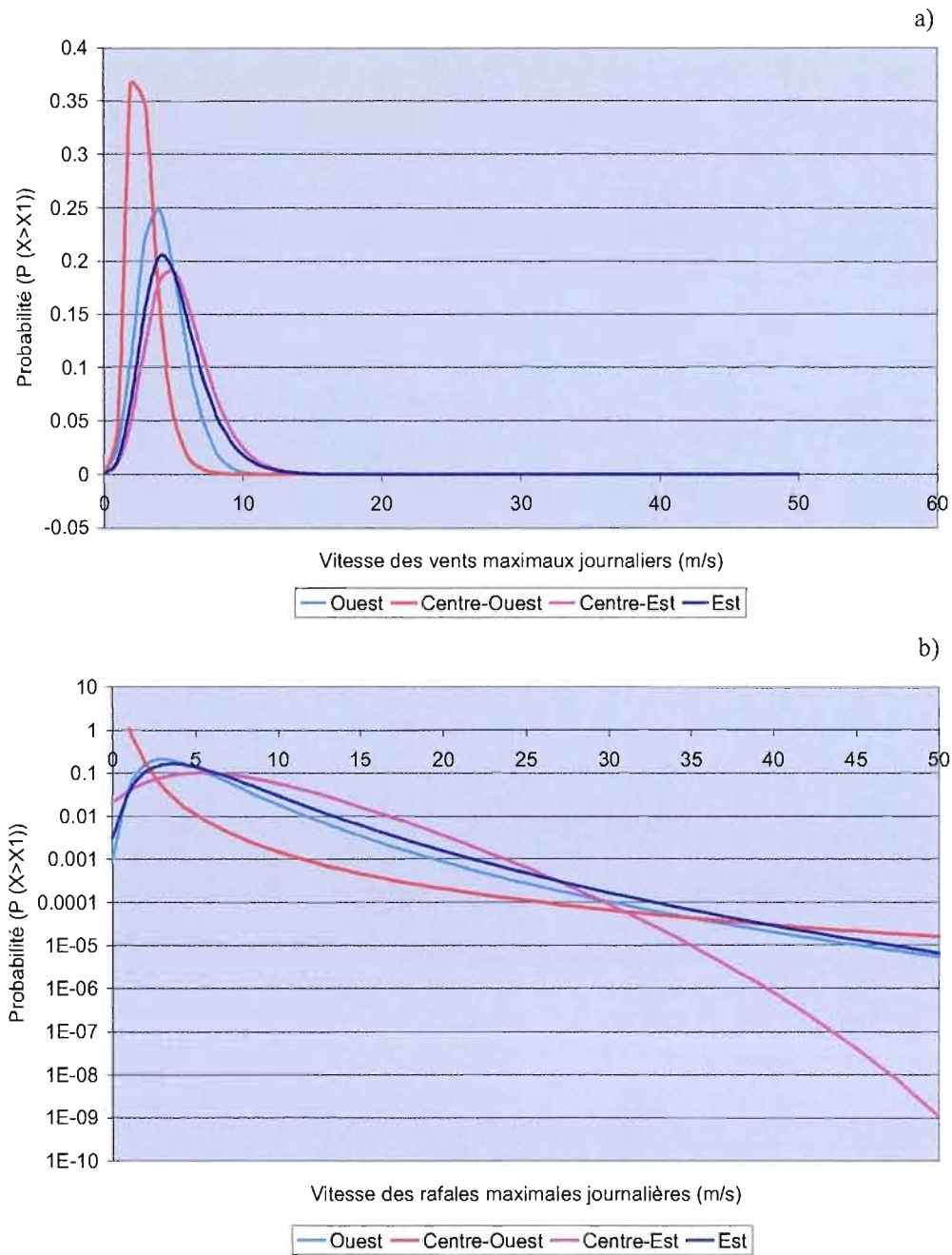


Figure 3.9 Distributions GEV modélisées pour la vitesse horaire maximal par jour (a) et les rafales journalières maximales (b) dans les quatre sous-régions de l'érablière à bouleau jaune

Les données de vitesses des rafales maximales journalières débutent à 8,6 m/s et on observe de façon générale (excluant la sous-région du Centre-ouest) une plus forte fréquence se situant approximativement entre 8,6 et 12,0 m/s (rafales modérées). On n'observe aucun vent extrême (vitesse ≥ 23 m/s) journalier, mais nous observons des rafales extrêmes dans les sous-régions du Centre-est et de l'Ouest.

Il y a des différences dans les vitesses des vents (maximaux journaliers) entre toutes les différentes sous-régions écologiques de l'érablière à bouleau jaune (Tableau 3.5, analyse de bootstrap). Il est à noter que les paramètres de distribution GEV des vents vitesses des vents de la sous-région "Centre-ouest" sont nettement différents des autres sous-régions. Il nous a été cependant impossible de modéliser les vitesses des rafales pour cette sous-région. Néanmoins, nous observons des similitudes (entre les sous-régions "Est" et "Centre-est" et "Centre-est" et Ouest) ainsi que des différences (entre les sous-régions "Est" et "Ouest") (Tableau 3.6, analyse de bootstrap). On remarque que les résultats des paramètres de distribution GEV démontre la présence de deux climats (maritime à l'est et continental à l'ouest) dans le domaine de l'érablière à bouleau jaune.

Tableau 3.5 Paramètres des distributions GEV et intervalles de confiance des vitesses des vents maximaux journaliers

sous-régions	Paramètres de la fonction GEV – vitesse des vents maximaux journaliers									
	Forme (k)				Location (μ)				Échelle(σ)	
	données originales (Env. Canada)	résultats après bootstrap	intervalle de confiance	données originales (Env. Canada)	résultats après bootstrap	intervalle de confiance	données originales (Env. Canada)	résultats après bootstrap	intervalle de confiance	
Est	-0,0482	-0,0320	-0,0230 -0,0413	4,1281	4,1124	4,0860 4,1364	1,7891	1,7649	1,7475 1,7821	
Centre-est	-0,0876	-0,0745	-0,0667 -0,0815	4,5083	4,4934	4,4699 4,5150	1,9123	1,9036	1,8880 1,9195	
Centre-ouest	-0,0140	0,0121	-0,0098 0,0346	2,4103	2,3958	2,3661 2,4231	0,88177	0,8611	0,8414 0,8793	
Ouest	-0,1416	-0,1065	-0,0951 -0,1244	3,5177	3,4875	3,4623 3,5126	1,4836	1,4773	1,4605 1,4950	

Tableau 3.6 Paramètres des distributions GEV et intervalles de confiance des vitesses des rafales maximales journalières

Paramètres de la fonction GEV – vitesse des rafales maximales journalières									
Sous-régions	Forme (k)			Location (μ)			Échelle(σ)		
	Données originales (Env. Canada)	Résultats après bootstrap	Intervalle de confiance	Données originales (Env. Canada)	Résultats après bootstrap	Intervalle de confiance	Données originales (Env. Canada)	Résultats après bootstrap	Intervalle de confiance
Est	0,1355	6,2309	3,7276 9,6307	2,2632	0,1910	0,0010 1,0584	3,9106	1,6401	7,3805e ⁻¹⁸ 9,3893
Centre-est	-0,0559	4,1630	2,1193 9,1486	3,6830	0,0943	0,0010 0,7754	5,1242	0,8044	6,6404e ⁻¹⁹ 6,6856
Centre-ouest	0,5668	ND	ND ND	0,3561	ND	ND ND	1,0264	ND	ND ND
Ouest	0,1707	4,9157	3,1015 8,5727	1,8228	0,0281	0,0010 0,1556	3,3176	0,2264	4,5182e ⁻¹⁸ 1,2699

ND : Non disponible

3.2.2. Probabilité des vents modérés à extrêmes

De façon générale, c'est dans les sous-régions de l'Est (Est et Centre-est) que nous retrouvons une probabilité plus élevée d'avoir des vents modérés à extrêmes, ≥ 7 m/s (données de vitesse des vents maximaux journaliers, Figure 3.10a). À 16 m/s, la probabilité chute drastiquement pour la sous-région de "Ouest". La sous-région "Est" est celle ayant une probabilité plus élevée d'avoir des rafales de vitesse et "Ouest" celle ayant la probabilité la moins élevée (données de vitesse rafales maximales journalières, Figure 3.10b). Les pointillés placés à l'intérieur des figures 3.10 a et b correspondent à la vitesse maximale observée pour chacune des sous-régions.

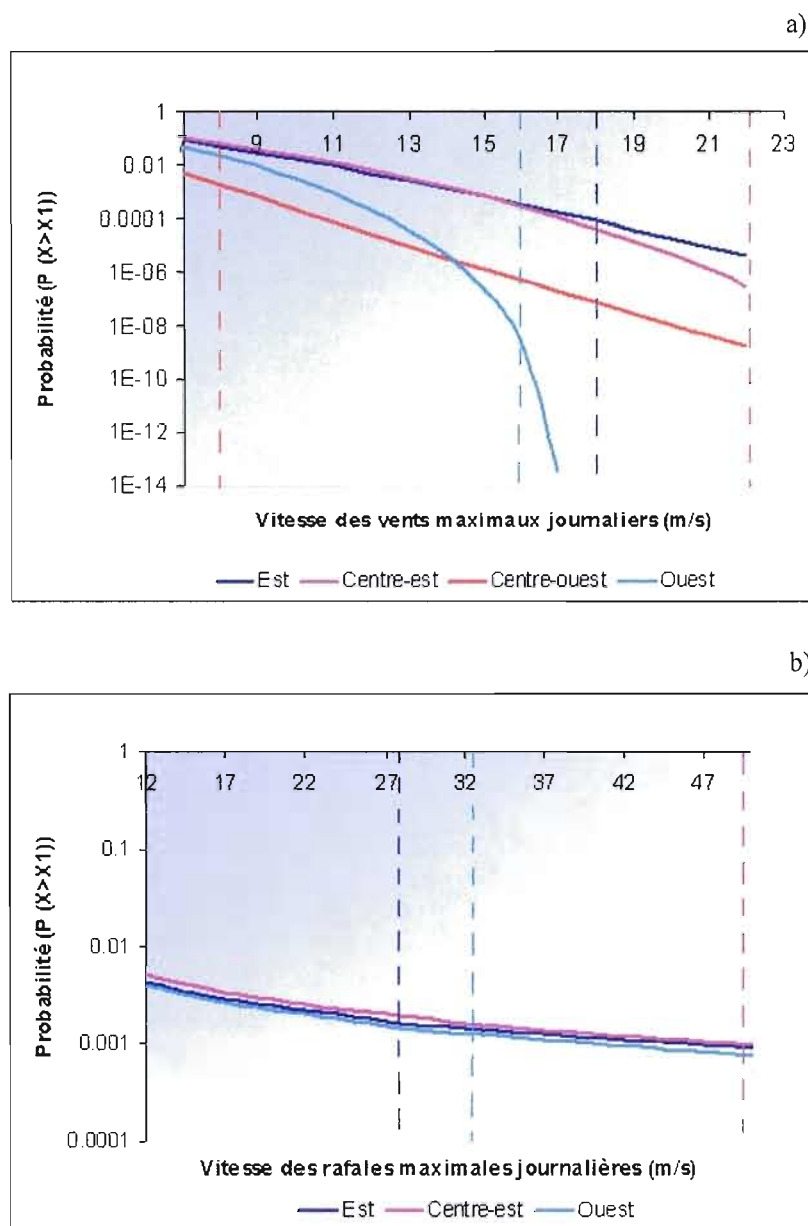


Figure 3.10 Probabilités des vents (a) et des rafales (b) modérés à extrêmes pour chacune des sous-régions écologiques de l'érablière à bouleau jaune basées sur les données ayant subi un bootstrap

3.2.3. Vitesse des vents modérés à extrêmes dans le temps

Données des vents maximaux journaliers (1962-1967 et 2005-2009)

Il existe une différence dans la vitesse des vents modérés à extrêmes (≥ 7 m/s) entre les périodes 1962-1967 et 2005-2009 ($\text{Prob}>F = <0,0001$), entre les sous-régions ($\text{Prob}>F = <0,0397$) et aussi entre les deux variables en interaction ($\text{Prob}>F = <0,0001$) (Tableau 3.7, Figure 3.11, analyse de variance par rang (Kruskal-Wallis)).

Tableau 3.7 Analyse de variance testant l'effet de la sous-région et de la période sur la vitesse des vents modérés à extrêmes pour les **périodes 1962-1967 et 2005-2009**

Source	Nparm	DF	Sum of squares	F Ratio	Prob >F
Sous-régions	1	1	4913949,4	33,3466	<0,0001
Périodes	1	1	624315,4	4,2367	0,0397
Sous-régions * périodes	1	1	2840984,0	19,2793	<0,0001

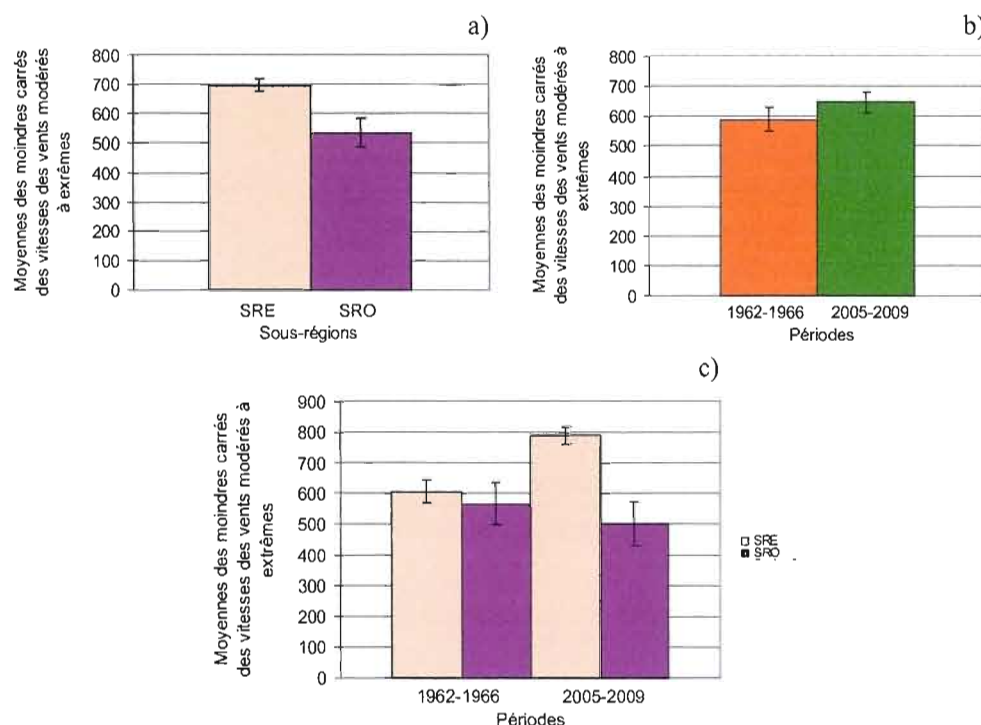


Figure 3.11 Moyennes des moindres carrés estimées par le modèle des vitesses des vents modérés à extrêmes des sous-régions (a)(ouest et est), des périodes (b) 1962-1966 et 2005-2009 ainsi que les interactions (c)

Les vitesses des vents modérés à extrêmes sont moins élevées pour la période de temps 1962-1966 comparativement à celle des années 2005-2009. Quant à l'effet des sous-régions, l'analyse a démontré que les vents sont plus élevés dans la sous-région "Est" que "Ouest" ($\text{Prob} > F = < 0,0001$). On observe que les vents modérés à extrêmes de la sous-région "Ouest" ont diminué dans la période de temps 2005-2009 ($\text{Prob} > F = < 0,0001$). Le contraire s'est produit pour la sous-région "Est" où les vents ont augmenté pour cette période de temps ($\text{Prob} > F = < 0,0001$). Ces résultats viennent renforcer ceux obtenus lors des calculs de probabilités où la vitesse des vents modérés à extrêmes s'est avéré plus élevée dans les sous-régions de l'Est (Est et Centre-est) et moins élevées dans les sous-régions de l'Ouest (Ouest et Centre-ouest).

Données des vents maximaux journaliers (1994-1998 et 2005-2009)

Les vitesses des vents maximaux journaliers modérés à extrêmes sont différentes ($\text{Prob} > F = < 0,0001$) entre les sous-régions écologiques mais aussi lorsque les sous-régions et les périodes 1994-1998 et 2005-2009 sont en interaction ($\text{Prob} > F = 0,0083$) (Figure 3.12, Tableau 3.8, analyse de variance (Kruskal-Wallis)). Aucune différence significative n'est notée dans les vitesses des vents modérés à extrêmes entre les deux périodes testées ($\text{Prob} > F = 0,6139$).

Tableau 3.8 Analyse de variance testant l'effet de la sous-région et de la période sur la vitesse des vents modérés à extrêmes pour les **périodes 1994-1998 et 2005-2009**

Source	Nparm	DF	Sum of squares	F Ratio	Prob > F
Sous-régions	3	3	149878264	38,7723	<0,0001
Périodes	1	1	328040	0,2546	0,6139
Sous-régions * périodes	3	3	15151980	3,9197	0,0083

Tableau 3.9 Différences des vitesses des vents modérés à extrêmes entre les sous-régions estimées par le test de tukey HSD

Sous-régions	Niveau*	Moyenne quadratique
SRE	A	2283,22
SRCE	B	2143,96
SRCO	ABC	1913,05
SRO	C	1588,14

*Les niveaux (level) qui ne sont pas reliés par la même lettre sont significativement différents.

Tableau 3.10 Différences des vitesses des vents modérés à extrêmes entre les sous-régions et les périodes en interaction estimées par le test de tukey HSD

Sous-régions	Périodes	Niveau*	Moyenne quadratique
SRE	2005-2009	A	2337,50
SRCO	2005-2009	ABC	2300,50
SRCE	1994-1998	AB	2229,08
SRE	1994-1998	AB	2229,08
SRCE	2005-2009	B	2058,84
SRO	1994-1998	C	1628,89
SRO	2005-2009	C	1547,40
SRCO	1994-1998	ABC	1525,60

*Les niveaux (level) qui ne sont pas reliés par la même lettre sont significativement différents.

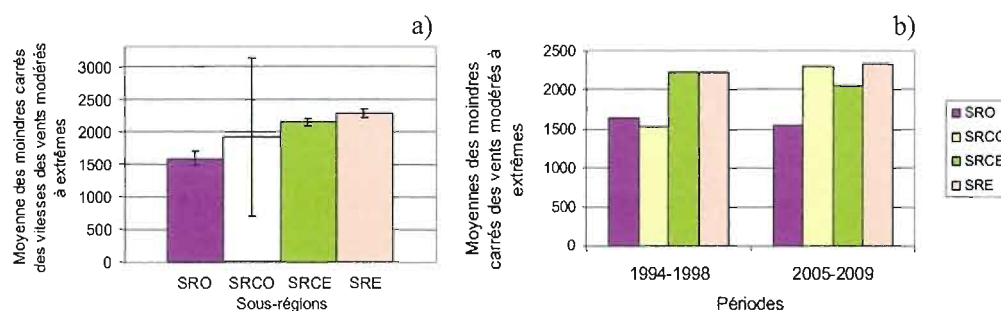


Figure 3.12 Moyennes des moindres carrés estimées par le modèle des vitesses des vents modérées à extrêmes des sous-régions (a), et des interactions (b)

La différence la plus marquante entre les vitesses des vents modérés à extrêmes pour les différentes sous-régions se situe entre la sous-région "Est" et la sous-région "Ouest" (test de tukey, $\alpha=0,050$, $Q=2,5700$) (Tableau 3.9).

Plusieurs différences sont observées entre les vitesses des vents modérés à extrêmes pour les différentes sous-régions et périodes en interaction, mais deux d'entre elles sont plus marquantes (test de tukey, $\alpha=0,050$, $Q=3,0324$) (Tableau 3.10). La plus marquante est

comprise dans la période 2005-2009. La vitesse des vents de la sous-région "Est" pour cette période est plus grande que ceux de la sous-région "Ouest" ($\text{Prob}>F = <0,0001$). On observe une tendance à l'augmentation des vitesses des vents entre les périodes. Toutefois, pour les sous-régions "Ouest" et "Centre-est", une diminution est observée.

Les résultats concernant la sous-région "Centre-ouest" ne seront pas pris en considération car il y a qu'une seule donnée observée de vitesse des vents supérieurs à 7 m/s pour la période "2005-2009".

Données rafales maximales journalières (1994-1998 et 2005-2009)

Les vitesses des rafales maximales journalières sont différentes entre les sous-régions pour les périodes 1994-1998 et 2005-2009 ($\text{Prob}>F = < 0,0001$) (Figure 3.13, Tableau 3.11, Kruskal-Wallis). Les vitesses des rafales modérées à extrêmes sont plus élevées dans la sous-région "SRE" (test tukey, $\alpha=0,050$, $Q=2,5724$) (Tableau 3.12). La différence la plus marquante se situe entre la sous-région "SRE" et "SRCO" ($\text{Prob}>F = <0,0001$).

Tableau 3.11 Effet des variables sous-régions et périodes lors de l'analyse de variance avec interaction

Source	Nparm	DF	Sum of squares	F Ratio	Prob >F
Sous-régions	3	3	3188809,4	7,9543	<0,0001
Périodes	1	1	518,6	0,0039	0,9503
Sous-régions * périodes	3	3	921077,6	2,2976	0,0759

Tableau 3.12 Différences des vitesses des rafales modérées à extrêmes entre les sous-régions et les périodes en interaction estimées par le Test de tukey HSD

Sous-régions	Niveau*	Moyenne quadratique
SRE	A	713,66
SRCE	B	638,21
SRO	B	589,19
SRCO	B	510,26

*Les niveaux (level) qui ne sont pas reliés par la même lettre sont significativement différents.

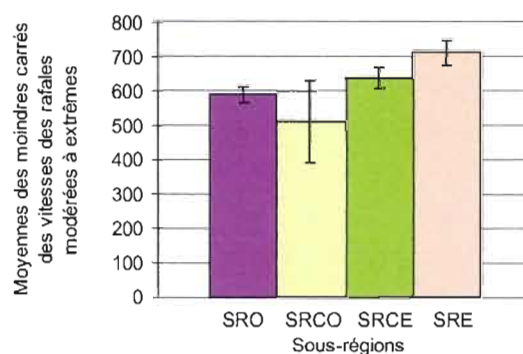


Figure 3.13 Moyennes des moindres carrés estimées par le modèle des vitesses des rafales modérées à extrêmes des sous-régions et des périodes 1994-1998 et 2005-2009 (modèle avec interaction)

3.2.4. Direction des vents

Les directions des vents dominants et des rafales de la sous-région "Est", "Centre-est" et "Centre-ouest" proviennent de l'ouest. Quant à la sous-région "Ouest", les vents et les rafales dominantes proviennent du sud et du nord (Figure 3.14; Figure 3.15).

Les vents et rafales fortes à extrêmes de la sous-région "Est" proviennent en majorité du sud-ouest. Ceux et celles de la sous-région "Centre-est" et "Centre-ouest" proviennent en majorité

de l'ouest et ceux et celles de la sous-région "Ouest" proviennent en majorité du sud et du nord.

On remarque dans la sous-région "Centre-ouest", qu'en plus d'avoir des vents et des rafales provenant en majorité de l'ouest, on y observe des vents et des rafales du sud qui ce qui la rapproche d'un point de vue comparatif de sa sous-région voisine "Ouest".

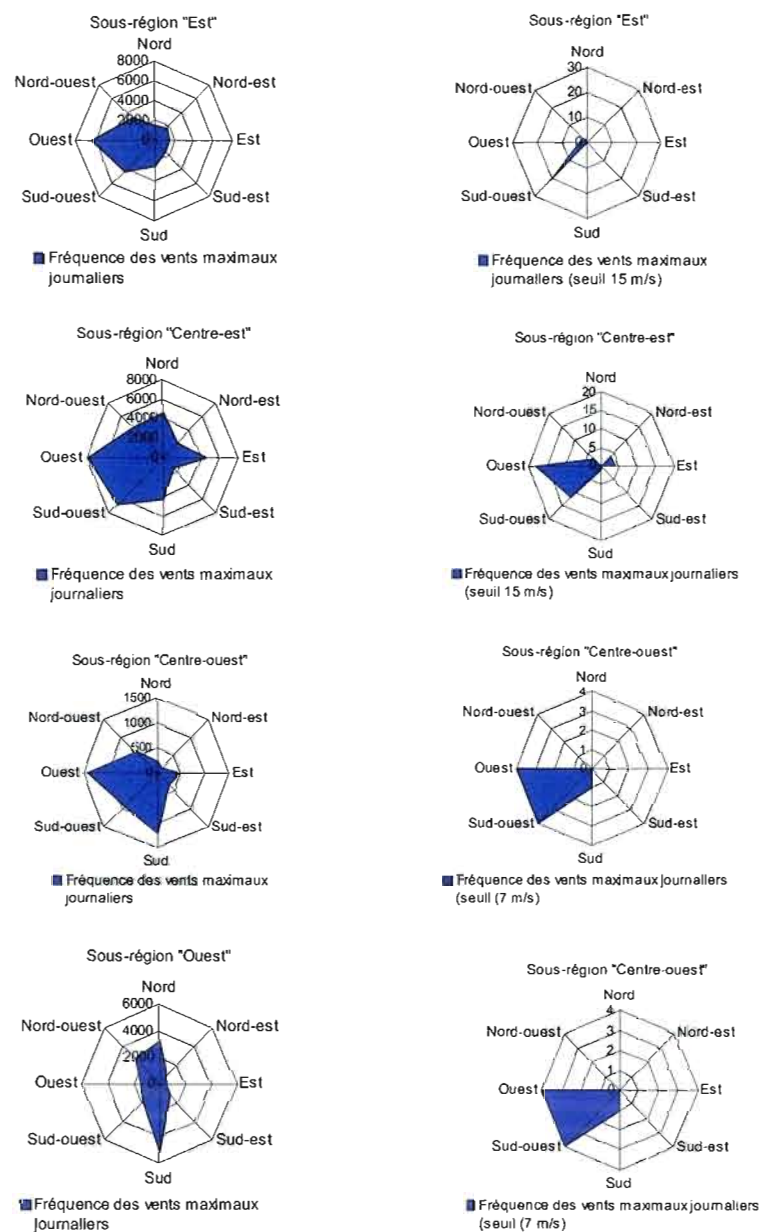


Figure 3.14 Diagramme de rose des vents (maximaux journaliers)

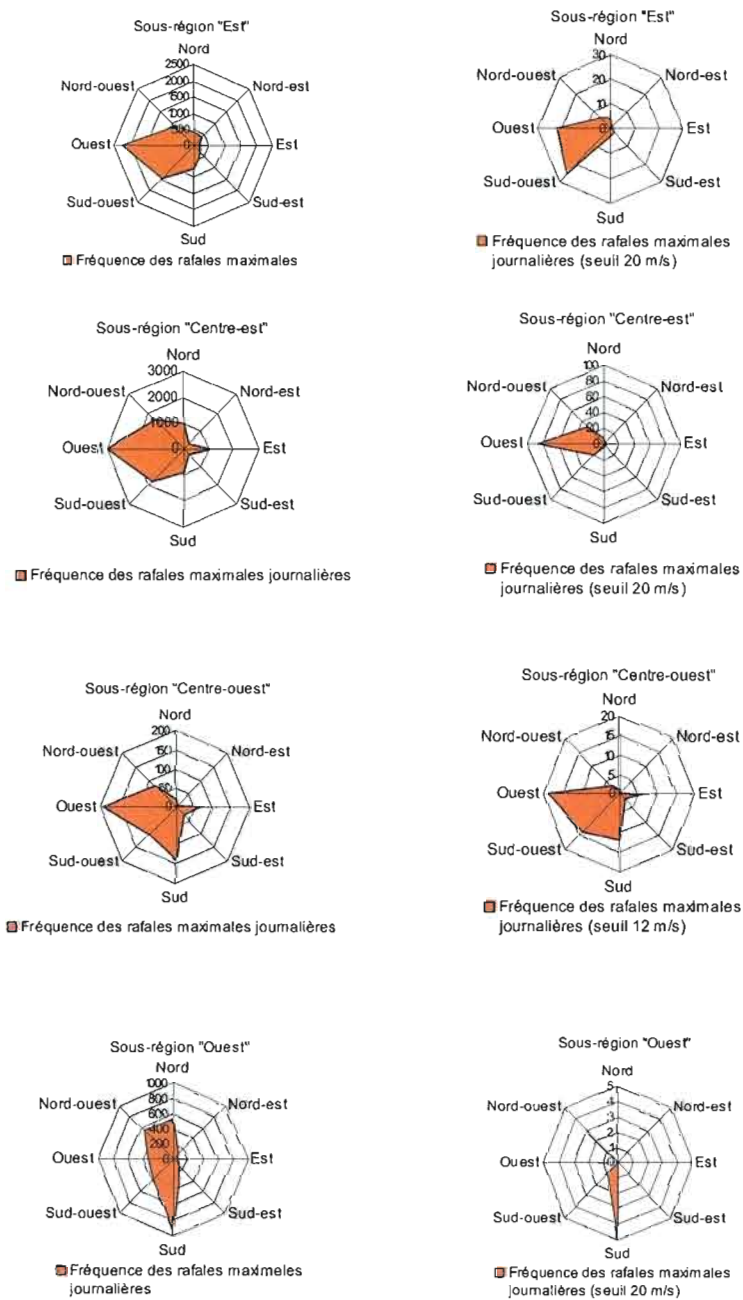


Figure 3.15 Diagramme de rose des rafales (maximales journalières)

CHAPITRE IV

4. DISCUSSION

4.1. Volet caractérisation du régime de perturbations par le chablis

Les chablis dans le domaine de l'érablière à bouleau jaune au cours du dernier siècle ont été très variables dans le temps ainsi que dans l'espace et ont touché de très faibles superficies. Pour les périodes à l'étude, les chablis sont localisés majoritairement dans la sous-région écologique "Ouest". De plus, la superficie affectée par ces perturbations augmente de façon importante entre 2000 et 2009.

En effet, les chablis durant le dernier siècle sont très variables dans l'espace. Pour 893 000 ha de territoire forestier, seulement 747 ha de chablis ont été répertoriés de part et d'autre dans l'érablière à bouleau jaune (Tableau 3.3). L'étude de Bouffard et al., (2003) indique aussi un très faible pourcentage de superficie atteinte par cette perturbation au cours de la deuxième moitié du siècle dernier. La superficie totale affectée par le chablis est la plus élevée dans la sous-région "Ouest" avec au total 610 ha pour un total de 2572 km² pour les quatre périodes réunies (Tableau 3.3, Figure 3.2). Ceci s'explique par le nombre de chablis élevé dans cette sous-région écologique mais aussi par la présence des trois plus grandes taches de chablis (183,5, 50,6 et 36,6 hectares) observées dans cette étude.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer le nombre élevé de chablis dans cette sous-région. En effet, il est fort possible que les chablis observés dans la sous-région "Ouest" soient dus à des rafales descendantes (downbursts) qui sévissent dans cette sous-région (Peterson, 2000b). Les rafales descendantes (micro-rafales) engendrent, dans la plupart des cas, des chablis plus discrets et localisés d'où l'importance des nombreux chablis de petites dimensions retrouvés dans cette sous-région. Ces micro-rafales peuvent causer des corridors de dommages sur quatre kilomètres de large (Futjita, 1985) ce qui pourrait aussi expliquer les chablis de plus grandes superficies comme celui de 185,5 ha retrouvé dans cette sous-région.

C'est dans la sous-région "Est" que l'on retrouve le moins d'hectares (17,20) affectés par le chablis. Cette sous-région est caractérisée par un dépôt de surface épais (till indifférencié épais) (annexe 1). Un dépôt épais procure un meilleur ancrage des racines dans le sol et une meilleure stabilité des arbres (Danjon et al., 2009; Colin et al., 2009). Contrairement, la sous-région "Ouest" est caractérisée par un dépôt de surface mince (till indifférencié mince).

Le pourcentage de type de peuplement peut expliquer le nombre élevé de chablis dans la sous-région "Ouest" mais il demeure un facteur peu convainquant. En effet, la sous-région "ouest" contient le plus bas pourcentage de forêt feuillue ce qui pourrait augmenter la susceptibilité au chablis (Tableau 2.2, Tableau 2.3)(Foster, 1988; Danjon et al., 2009). Toutefois, étant donné que les pourcentages des types de peuplements ne sont pas si différents entre les différentes sous-régions, et d'autant plus que le pourcentage des résineux est plus élevé dans la sous-région "Est", il est fort possible que ce facteur n'ait aucune crédibilité dans cette étude.

D'un point de vue temporel, on remarque une augmentation du nombre de taches de chablis au cours du 20^{ième} siècle dans le domaine de l'érablière à bouleau jaune (Tableau 3.3). Cette augmentation est surtout remarquée pour la période 2000-2009. Nos résultats viennent appuyer ceux de Roy et al., (2010). En effet, leur étude effectuée sur une superficie de 3 078 032 ha à l'aide de photos aériennes a démontré qu'il y a une augmentation des chablis durant le 20^e siècle au Témiscamingue. L'étude de Peterson et al. (2008) a démontré un patron semblable. En effet, le nombre d'événements extrêmes, leur fréquence, leur sévérité de même que les coûts reliés aux dommages ont augmenté durant le siècle dernier (Peterson et al., 2008). Selon eux, c'est à partir des années 1960 qu'on observe une augmentation encore plus importante d'événements catastrophiques.

Les intervalles de retour pour les différentes périodes illustrent aussi cette observation (Tableau 3.4). Pour chacune des sous-régions respectivement, les intervalles de retour sont plus grands pour les périodes en début et au milieu du siècle dernier (Tableau 3.4). Les intervalles de retour obtenus dans la sous-région "Ouest" (période 1970-1980=7822 ans et

période 2000-2009=1731 ans) viennent soutenir ceux de Roy et al., (2010) dans lequel ils ont retrouvé pour la période 1980-2000 un intervalle de 4058 ans. Toutefois, l'intervalle de retour que nous avons estimé pour la sous-région "Centre-ouest" (période 2000-2009=17856 ans) est plus grand que celui estimé par Nolet et al., (1999) (période 1980-2000=6822 ans). Néanmoins, tout comme Vaillancourt, (2008) on observe une augmentation des intervalles de retour pour chacune des sous-régions d'ouest en est. En effet, pour toutes périodes comprises, nous obtenons un intervalle de retour de 199 012 ans pour la sous-région "Est" et de 5387 ans pour celle de l'Ouest. Selon Vaillancourt, (2008) l'érablière à bouleau jaune de l'Est a un intervalle de 241 300 ans et celle de l'Ouest de 109 010 ans. La différence dans les intervalles de retour entre ces deux études peut être due à la méthode utilisée.

Plusieurs raisons peuvent expliquer l'augmentation au 20^{ième} siècle des événements des chablis, notamment par des explications d'ordre technique et d'ordre écologique. En effet, la source d'information employée pour cibler les chablis dans l'espace de la période 2000-2009 (cartes écoforestières) semble être beaucoup plus précise que la base de donnée SIFORT utilisée pour la période 1970-1980. Nous observons une nette augmentation du nombre de taches de chablis lors de la période 2000-2009. Ceci pourrait être dû à la méthode de sous-échantillonnage de SIFORT dont les tesselles couvrent une superficie de 14 hectares. Les chablis sont souvent de petites taches et la probabilité de ne pas relever ces chablis dans le sous-échantillonnage que SIFORT pourrait être importante. Dans cette présente étude la grandeur moyenne des chablis dans le domaine de l'érablière à bouleau jaune est de 7,78 ha. Plusieurs d'entre eux peuvent donc ne pas être détectés dans le sous-échantillonnage de SIFORT. On peut observer ce fait dans l'étude de Vaillancourt (2008) dont la base de données SIFORT a été utilisée pour estimer les intervalles de retour des chablis. Dans cette revue de littérature (Vaillancourt, 2008), on observe que les intervalles de retour sont nettement plus élevés que ceux estimés dans cette présente étude où la photo-interprétation ainsi que des cartes écoforestières ont été employés. Il se pourrait ainsi qu'il y ait une sous-estimation des chablis dans le travail de Vaillancourt (2008) et par le fait même une augmentation des intervalles de retour.

Les changements climatiques dont l'augmentation des températures terrestres (Agence canadienne d'évaluation environnementale, 2010) depuis 1900 peuvent aussi expliquer l'augmentation des événements des chablis. Depuis 100 ans on observe une lente augmentation des températures, mais depuis 25 ans, ce réchauffement s'est accentué de façon notable (Environnement Canada, 2009a). Effectivement, les 10 années les plus chaudes à l'échelle mondiale ont eu lieu depuis 1990. Ces augmentations peuvent avoir des conséquences. En effet, une augmentation de la température peut entre autres favoriser l'augmentation de l'humidité et donc accroître les probabilités d'avoir des orages plus forts. Rappelons que les orages violents peuvent générer des vents dommageables pouvant causer des chablis. De plus, des océans plus chauds peuvent favoriser la formation d'ouragans et venir toucher l'est de la province du Québec par des vents violents (Dotto et al., 2010). Ces divers événements climatiques peuvent engendrer de forts vents et ainsi affecter le couvert forestier par des chablis (Corvol, 2009). Nos observations vont donc dans le même sens que les prévisions à venir (accélération du réchauffement atmosphérique, tempêtes et ouragans plus sévères, augmentation du risque de tempêtes) faites par les spécialistes de la climatologie (Schwartz et Randall, 2003; McBean et Henstra, 2003; Bruce, 2011).

D'autres raisons peuvent expliquer l'augmentation du nombre de chablis durant le 20^{ème} siècle. On parle ici des feux de forêt et des épidémies de la livrée des forêts et de la tordeuse des bourgeons de l'épinette (TBE). Celle-ci est une perturbation naturelle qui apparaît de façon cyclique à tous les 25 à 40 ans (Morin et al., 2008). Trois épisodes de TBE ont eu lieu durant le dernier siècle (1906-1919, 1939-1948 et 1974-1988) (Jardon, 2001; Morin et al., 2007; Morin et al., 2008). «Selon Blais (1983), l'épidémie du début du 20^e siècle aurait été moins sévère que la deuxième, elle-même moins sévère que la dernière en terme de territoire couvert et de mortalité engendrée » (Morin et al., 2008). La TBE affaiblit les résineux qui peuvent ensuite être atteints par les pourridiés des arbres, maladies qui engendrent des caries chez les arbres pouvant créer des ouvertures dans la canopée et augmenter la susceptibilité au chablis (Laflamme, 2005). Quant à la livrée des forêts, elle a affectée de façon importante les forêts feuillues québécoises. D'importantes invasions de livrée ont eu lieu de 1930 à 1939, 1949 à 1954, 1965 à 1968, 1978 à 1982, 1985 à 1995 et 1999 à 2004 (Gouvernement du Québec, 2011c). Les livrées dévorent les feuilles et les fleurs de leurs hôtes (plus

particulièrement le peuplier faux tremble, le bouleau à papier, l'érable à sucre, les saules et le chêne rouge). Elles peuvent même affecter les bourgeons et la croissance de l'arbre en diamètre devenant ainsi vulnérable aux insectes secondaires et aux maladies (Gouvernement du Québec, 2011c).

Les feux peuvent aussi expliquer l'augmentation du nombre de chablis durant le dernier siècle. En effet, « la période 1950-2000 a connu une activité de feu plutôt faible comparativement au plan historique » (Girardin et al., 2008). De fortes activités de feu aurait eu lieu à l'ouest du Québec boréal au début du siècle (1910-1940) pour ensuite observer une période d'accalmie (1940-1969) (Girardin et al., 2004a et 2004b). Les feux diminuent le nombre de peuplements matures et par conséquent diminuent la susceptibilité au chablis. En effet, les individus les plus vulnérables sont généralement ceux de grandes tailles (Peterson et Pickett, 1991). Les peuplements de faible hauteur (< 20 m) sont très peu touchés, même en présence de fortes vitesses du vent (Colin et al., 2009). Parce que les feux du début du 20^{ème} siècle auraient rajeuni les forêts dans le paysage, il se pourrait que cela explique pourquoi nous observons peu de chablis au début du siècle et un plus grand nombre à la fin du siècle.

Contrairement à ce à quoi on s'attendait, la superficie des taches de chablis est similaire entre les sous-régions. Néanmoins, les différences les plus marquantes impliquent la sous-région "Est". Cette sous-région se démarque par une moyenne des superficies plus élevée comparativement aux autres due à un unique chablis observé (Tableau 3.3). De ce fait, les résultats statistiques effectués sur les superficies affectées par le chablis impliquant la sous-région "Est" seront à considérer avec prudence. Nous n'observons aucune différence significative entre les classes de tailles des taches de chablis. Toutefois, les taches de chablis sont plus nombreuses dans la classe de taille 5-25 ha ce qui signifie que le domaine de l'érablière à bouleau jaune est caractérisé par un grand nombre de chablis de petites tailles.

Le nombre de taches de chablis totaux s'avère plus élevé que celles des chablis partiels pour toutes les périodes (excluant celle de 1970-1980) (Tableau 3.1). Comme il est plus ardu de détecter les chablis partiels sur photo aérienne due à la fermeture du couvert forestier, il se

pourrait que le nombre de taches de chablis partiel soit sous-estimé. Des différences ont été observées dans les sévérités des chablis entre la sous-région écologique "Ouest" et toutes les autres sous-régions. La sévérité des chablis est influencée par l'interaction de plusieurs facteurs biotiques et abiotiques. Parmi ceux-ci, on compte la force et la nature des tempêtes. Les vents catastrophiques provenant de tornades ou de rafales descendantes sont la cause majeure des perturbations naturelles par le chablis dans le nord-est américain (Peterson, 2000b). Selon environnement Canada (2010a), Gouvernement du Québec (2010b) et le Centre canadien sciences et médias (2011), les couloirs de circulation des tornades se situent dans le sud-est et sud-ouest de la province du Québec. Le fait d'observer peu de chablis dans la sous-région "Est" découlerait peut-être de la faible probabilité annuelle ($<0,1\%$) que la province soit touchée par des tornades pouvant causer des dommages (Newart, 1984). De plus, parce que la région principale de formation se trouve entre 90° et 120° W de longitude et 20° et 10° N de latitude (James et Birol, 1999), il est peu probable que les ouragans remontent près du 45° parallèle le long de la côte est américaine jusqu'à la sous-région écologique "Est" du domaine de l'érablière à bouleau jaune et viennent affecter cette sous-région par des vents violents. D'autres facteurs non étudiés dans cette étude viennent aussi interagir, comme l'architecture racinaire et les caractéristiques de la topographie et des peuplements du territoire qui modifie la susceptibilité des peuplements et l'intensité de l'agent perturbateur.

Limites de la méthodologie

La photo-interprétation s'avère un excellent complément aux données provenant de la base de données SIFORT. Cet outil permet de cibler l'endroit où se trouvent les chablis. Toutefois, étant donné que la méthode de sous-échantillonnages de SIFORT couvre 14 hectares (tesselles), la superficie d'arbres renversés est souvent inexacte. La réalisation d'une photo-interprétation d'un secteur ayant été affecté par le chablis, à la suite d'une consultation des données de SIFORT, permet d'obtenir la superficie exacte perturbée par le chablis. Toutefois, il est fort possible que des chablis n'ont pas été sous-échantillonnés à l'aide de SIFORT étant donné l'espace de 15 secondes entre les tesselles (Gouvernement du Québec, 2011a). Il est donc possible d'avoir un biais conservateur avec ce système. Bien que la photo-interprétation permette d'évaluer de grandes superficies forestières, il existe plusieurs

désavantages liés à l'utilisation de cette approche. En effet, une inexactitude de l'interprétation des photos lors de l'identification des chablis peut survenir suite à la qualité des photos aériennes et de la réponse rapide de la végétation (Nolet et al., 1999). Nous avons jugé qu'au delà de 15 ans les chablis ne sont plus détectables due à la croissance des arbres et de la fermeture de la canopée. La grandeur des chablis aussi peut rendre la tâche plus ardue. Les chablis de 2 hectares et moins sont plus difficiles à détecter par photo-interprétation. Une sous-estimation de ces chablis peut survenir. De plus, les saisons auxquelles les photos ont été prises suscitent aussi des difficultés. Bien que les photos aériennes prises durant l'été permettent d'apercevoir facilement les trouées dans la canopée, il peut être difficile d'observer certaines caractéristiques des trouées telles que la direction des vents lors de l'événement perturbateur. En effet, les arbres cassés, ou déracinés sont très souvent cachés par la végétation. Cette difficulté s'applique approximativement aux chablis de 6 ans et plus. Toutefois, à partir des photos aériennes prises au printemps et à l'automne (arbres dépourvus de leurs feuilles) il est plus facile d'observer les arbres cassés et déracinés mais plus ardu d'apercevoir les trouées créées par les chablis.

Les chablis partiels sont difficiles à visualiser sur photo aérienne puisque pouvant être confondus avec une intervention humaine comme le jardinage. Pour contrer cet inconvénient, les territoires possédant des trouées partielles et démontrant la présence de l'homme, comme des chemins, ont été exclus. À cause à ces précédentes difficultés nous sommes conscients qu'il se pourrait que la superficie totale des taches de chablis partiel soit sous-estimée et que l'évaluation de l'intervalle de retour soit ainsi surestimée. Toutefois, comme cette étude a été effectuée à l'échelle du paysage, de grandes superficies de territoire ont été évaluées, donc dans ce sens, la photo-interprétation devient un excellent outil malgré les inconvénients que cette approche peut apporter.

4.2. Volet caractérisation du régime des vents extrêmes

Aucune étude n'a été effectuée, dans le passé, sur le régime des vents extrêmes dans l'érablière à bouleau jaune. Cette présente étude démontre quelques points déterminants qui peuvent apporter des connaissances indispensables à la gestion du risque liée au chablis. En

effet, pour les périodes à l'étude, les vents à l'intérieur de l'érablière à bouleau jaune ont des distributions de vitesse de vents différentes entre les sous-régions (Tableau 3.5) et des distributions de vitesse de rafales similaires entre certaines sous-régions (Tableau 3.6). Les vents maximums les plus puissants se situent dans les sous-régions de l'est (Est et Centre-est). On observe aussi que les vents ont augmenté entre les périodes 1962-1967 et 2005-2009 dans la sous-région "Est". De plus, la provenance des vents diffère entre les sous-régions, mais de façon générale on observe que les directions des vents et des rafales sont majoritairement en provenance de l'ouest et du sud-ouest.

Comme attendu, les rafales et vents forts et extrêmes sont moins fréquents que les vents modérés (Figure 3.8). Nous observons des différences dans la distribution de fréquence des vitesses des vents entre chacune des sous-régions (Tableau 3.5). Des similitudes (entre les sous-régions "Est" et "Centre-est" et "Centre-est" et Ouest) ainsi que des différences (entre les sous-régions "Est" et "Ouest") sont observées dans la distribution de fréquence des vitesses des rafales (Tableau 3.6). On observe la démarcation entre les sous-régions de l'ouest (Centre-ouest et Ouest) et de l'est (Centre-est et Est). Le domaine de l'érablière à bouleau jaune comprend deux climats distincts (tempéré maritime à l'est et tempéré continental à l'ouest) qui selon nos résultats démontrent des régimes de vents différents. Tout d'abord, nous avons été surpris de ne constater aucun vent extrême (≥ 23 m/s) dans l'érablière à bouleau jaune. Toutefois, les vents forts (≥ 15 -22 m/s) sont bien présents en particulier dans les sous-régions de l'est (Est et Centre-est). La sous-région "Centre-est", se démarque des autres sous-régions. En effet, c'est dans cette sous-région que l'on retrouve les rafales et les vents les plus forts (Figure 3.8). Une rafale très importante de 49,176 m/s (177 km/h) est survenue en 1962 dans cette sous-région. Aucune autre rafale de cette ampleur n'a été répertoriée dans les archives dans les autres sous-régions écologiques de l'érablière à bouleau jaune. Cependant, une rafale non négligeable a eu lieu dans la sous-région "Ouest" avec une vitesse de 32,5 m/s (117 km/h) en 2003. Il est fort probable que d'autres rafales aussi fortes n'aient pas été captées par les stations météorologiques puisque ces phénomènes sont très localisés.

Aucune observation de rafales et de vents forts à modérés n'a été répertoriée dans la sous-région "Centre-ouest". Ceci peut s'expliquer par le fait qu'il y ait eu extraction de données provenant d'une seule station météorologique localisée dans cette sous-région et donc d'un moins grand nombre d'observations.

Quant aux probabilités d'avoir des vents et des rafales modérés à extrêmes, elles sont plus élevées dans les sous-régions de l'Est (Est et Centre-est) mais aussi dans la sous-région "Ouest" pour les rafales uniquement (Figure 3.10). Cette dernière observation peut être expliquée par la présence des Grand lacs du centre de l'Amérique du Nord, non loin de cette sous-région et donc subir le système climatique de cette région. En effet, les rafales descendantes (downbursts) sont actives dans la région des Grands Lacs (Peterson, 2000b). La sous-région "Centre-ouest" est celle qui démontre les probabilités les moins élevées probablement due à la raison citée plus haut (peu d'observation).

Dans l'ensemble, la moyenne de la vitesse des vents a augmenté dans le domaine de l'érablière à bouleau jaune durant la deuxième moitié du siècle dernier (Figure 3.11b; Tableau 3.7). En effet, on observe une augmentation de 10,1 % entre les périodes 1962-1967 et 2005-2009. Une étude effectuée dans la région des Grand lacs a révélé une augmentation des vitesses du vent de 5 % par décennie depuis 1985 (Desai et al., 2009). De plus, Siegismund et Schrum (2001) ont observé une augmentation de 10% de la moyenne des vitesses des vents dans la mer du Nord entre 1961 et 2001. Autre observation importante et non négligeable ; dans un espace de 15 ans (1994-1998 et 2005-2009) on observe une augmentation de la moyenne de la vitesse des vents de 8,3%. Néanmoins, aucune augmentation de la vitesse des rafales n'est constatée depuis les 15 dernières années.

Comme attendu, on observe majoritairement des vents et des rafales de vent en provenance de l'ouest et du sud-ouest (Figure 3.14; Figure 3.15). En effet, entre 30° et 60° de latitude, la circulation méridienne est caractérisée par une cellule de circulation appelée Ferrel dont la circulation générale provient de l'ouest (Guyot, 1999). Toutefois, la sous-région "Ouest" se démarque des autres sous-régions avec des directions de vents et de rafales en provenance du

nord-ouest et du sud. Malheureusement, on ne connaît pas la cause de ce phénomène. Néanmoins, cette différence avec les autres sous-régions s'effectue graduellement. En effet, on observe dans la sous-région "Centre-ouest" une plus grande fréquence de vents et de rafales de direction sud comparativement aux autres situées plus à l'est. On pourrait donc dire que le climat maritime est caractérisé par des vents dominants en provenance de l'ouest et du sud-ouest et le climat continental caractérisé par des vents dominants en provenance du sud et du nord ouest. De plus, avec une augmentation de seuil de vitesse, tant pour les vitesses maximales horaires que les rafales maximales journalières, on remarque 1) que les directions sont plus concentrées dans moins de classes de direction et 2) une meilleure concordance des directions entre les vents et les rafales (Figure 3.14; Figure 3.15).

4.3. Relation entre le régime de chablis et le régime de vents

De pair avec la topographie du territoire, il ne fait aucun doute que les vents et les rafales de vent sont des agents précurseurs importants de chablis. Malgré qu'il nous ait été impossible d'attribuer un événement climatique spécifique aux événements de chablis dans cette présente étude, nous pouvons quand même tenter de faire quelques liens sur la base des comparaisons régionales et temporelles effectuées pour chaque régime (chablis et vent). La sous-région "Ouest" démontre une activité assez forte d'événements de chablis comparativement aux autres-sous-régions. Cette activité peut s'expliquer par la présence des rafales descendantes (downbursts). Malgré que nous n'ayons aucune information qualitative concernant le régime de cette perturbation climatique, on peut toutefois supposer que cet événement peut être l'une des causes principales des dommages importants retrouvés dans cette sous-région. En effet, deux chablis importants ont été répertoriés dans la région du Témiscaminque depuis les 28 dernières années. Ces chablis ont été générés par des rafales descendantes (downbursts) lors d'orages violents (Doyon et Bouffard, 2008). Toutefois, nos résultats démontrent que les vitesses des vents et les rafales dans cette sous-région (Ouest) ne sont pas les plus grandes comparativement aux autres sous-régions. Comme les rafales descendantes (downbursts) sont très localisées, il est fort probable que la vitesse des vents de ces phénomènes climatiques n'ait pas été captée par l'une des stations météorologiques si

elles sont actives loin de l'une des stations. Le nombre de stations météorologiques semble être insuffisant afin d'évaluer l'activité des chablis sur le territoire.

En plus d'observer une augmentation du nombre de taches de chablis et de superficie totale affectés par cette perturbation au cours du dernier siècle, on observe une augmentation de la vitesse des vents. En effet, au cours des derniers 47 ans, on observe une augmentation de la vitesse des vents de 10,1% et des derniers 15 ans, une augmentation plus importante de 8,3%. Une augmentation de la vitesse des vents affecte directement le régime de chablis en augmentant le nombre d'événements, la sévérité et l'étendue de ces perturbations (Tableau 3.1, Tableau 3.4, Figure 3.2). Diverses études arrivent à la même conclusion. Rappelons que le chablis de 2006 qui a causé des dommages sur 7600 ha au Témiscamingue lors d'un orage violent caractérisé par des vents entre 80 et 120 km/heure (Bordeleau et al., 2006). Un autre orage violent caractérisé par des vents de 50 m/s a eu lieu en 1977 causant 344 000 ha de dommage dans l'est du Minnesota et le centre nord du Wisconsin (Fujita, 1978). En Europe même son de cloche. Dans les forêts de la Suède, les dommages dus à des tempêtes ont augmenté durant le dernier siècle avec un pic aux alentours des années 1980 (Nilson et al., 2004). Sans oublier les tempêtes de la fin décembre 1999 en France qui ont détruit 500 000 ha et dont des rafales allant jusqu'à 173 km/h ont été enregistrées (Stach et Deshayes, 2009; Bessemoulin, 1999). De plus, selon Environnement Canada (2009b), il y aurait eu en 2009 trois tornades de plus que la moyenne au Québec, soit huit tornades. C'est le plus grand nombre de tornades enregistrées depuis 2004 dans la province du Québec. Les spécialistes du climat pensent, supportés par les simulations des modèles climatiques, que le changement climatique pourrait avoir pour effet d'augmenter la fréquence et l'intensité des perturbations naturelles ainsi que les conditions climatiques extrêmes (Bourque et Simonet, 2008). Dans un tel cas, on pourrait donc expérimenter une augmentation de l'importance des chablis dans l'érablière à bouleau jaune.

Quant aux directions majoritaires des vents lors des chablis, elles provenaient du sud, sud-est et sud-ouest. On peut donc affirmer que les vents les plus dommageables proviennent en majorité du sud, sud-est et sud-ouest. Selon Environnement Canada (2010c), les vents maximums sont enregistrés le plus souvent (52% des cas) dans le quadrant sud-est. De plus,

il y a concordance des directions des vents lors des événements de chablis, pour les sous-régions "Est, Centre-ouest et Ouest", et des directions des vents et des rafales provenant de la base de données d'Environnement Canada lorsqu'on établit un seuil de vitesse de vents élevé (rafales et vents forts et extrêmes). Par exemple ; on observe dans la sous-région "Est" que la direction des vents lors du chablis provenait du sud-ouest (Figure 3.7). Tandis que la direction des rafales et des vents forts et extrêmes est aussi majoritairement de provenance sud-ouest (Figure 3.15). Un autre exemple ; la direction des vents, de la sous-région "Ouest", lors des chablis provenait du sud-est (Figure 3.7). Tandis que la direction des rafales fortes à extrêmes est majoritairement de provenance du sud et la direction des vents forts et extrêmes est de provenance nord et sud (Figure 3.14; Figure 3.15).

CONCLUSION GÉNÉRALE

La réalisation de ce projet a permis de caractériser les régimes de perturbation par le chablis et des vents extrêmes dans le domaine de l'érablière à bouleau jaune. Les principaux résultats indiquent que les chablis sont très variables aussi bien dans l'espace que dans le temps. Cet aspect du régime de chablis dans le domaine de l'érablière à bouleau jaune apporte donc des défis importants face à la gestion du risque associé à cette perturbation. De plus, le nombre de taches de chablis ainsi que la superficie totale affectée par cette perturbation ont augmenté (particulièrement dans la sous-région "Ouest") depuis une dizaine d'année. Même observation concernant le régime des vents. On observe une augmentation importante de 8,3% de la vitesse des vents depuis 15 ans. Une gestion appropriée de la forêt tempérée s'avère des plus nécessaires étant donné que les modèles climatiques à long terme (prochains 100 ans) démontrent une augmentation des changements climatiques (GIEC, 2007).

Actuellement, l'indice d'exposition au vent attribue à chaque direction le même risque d'exposition. Or, nos données montrent que ce risque d'exposition n'est pas égal entre les directions. Cette étude nous a permis d'obtenir une meilleure compréhension de la direction des vents et rafales de vitesses susceptibles de générer des chablis, ce qui nous permet de recommander de pondérer l'importance des directions de vents dans le calcul de l'indice d'exposition au vent, et cela en fonction des sous-régions, puisqu'une différence importante existe entre la sous-région "Ouest" et les trois autres sous-régions.

Dans la perspective où l'on veut évaluer de façon plus précise le régime des vents ainsi que le régime de chablis, il faudrait pouvoir étudier ceux-ci sur une plus longue période de temps. De cette façon, nous aurions une meilleure estimation des intervalles de retour, des occurrences ainsi que les fréquences des événements de chablis et des vents extrêmes.

Dans le futur, la gestion par l'approche de l'aménagement écosystémique des forêts tempérées du Québec nécessitera une planification adéquate sous régime équienne. Un

travail qui ne devrait pas exiger de nombreux compromis étant donné que le régime de perturbation par le chablis est beaucoup moins important que certains pouvaient le penser. En effet, en cumulant les chablis totaux et partiels, on obtient AU PLUS COURT, un intervalle de retour de 1731 ans, ce qui donne un taux annuel de perturbation de 0,06%. Pour illustrer, sachant qu'un peu plus de la moitié de nos chablis étaient des chablis totaux (60%), sur un territoire de 1 millions ha, pour imiter le régime de chablis, on pourrait couper 360 ha en coupe totale par année. Ceci est sans considérer que les chablis continueront d'opérer sur le paysage. La superficie annuelle perturbée est trop faible et donc nous recommandons de traiter les chablis a posteriori dans le calcul de la possibilité forestière, à moins que les taux changent avec les changements climatiques. Néanmoins, cela n'empêche pas qu'il faut mieux comprendre la susceptibilité au vent pour en réduire l'impact sur la disponibilité des volumes.

Dans un futur où les changements climatiques peuvent continuer d'évoluer, certaines mesures doivent être à considérer. La sévérité des tempêtes et leurs nombres ont de fortes chances d'augmenter selon les modèles climatiques (GIEC, 2007) et par le fait même affecter de nombreux hectares forestiers et ainsi diminuer la production courante à court et à moyen terme pendant une durée d'au moins 15 à 20 ans (Pignard et al., 1999).

BIBLIOGRAPHIE

- Agence canadienne d'évaluation environnementale, 2010.** *Changement climatique et évaluation environnementale : Partie 2 : Guide du changement climatique aux fins des évaluations environnementales.* [en ligne]. <http://www.ceaa.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=9699932c-1&offset=8&toc=show>
- Allen, L. H., 1968.** *Turbulence and wind spectra within a Japanese larch plantation.* Journal of Applied Meteorology 7, 73-78.
- Arévalo, J.R., DeCoster, J.K., McAllister, S.D. and Palmer, M.W., 2000.** *Changes in two Minnesota forests during 14 years following catastrophic windthrow.* Journal of Vegetation Science. 11 : 833-840.
- Atlas canadien d'énergie éolienne, 2008.** [en ligne]. *Carte globale.* <http://www.atlaseolien.ca/fr/maps.php?field=EU&height=30&season=ANU>
- Bellingham, P. J., Kohyama, T., Aiba, S.-I., 1996.** *The effects of a typhoon on Japanese warm temperate rainforests.* Ecological Research. 11, 219 -247.
- Bessemoulin, P., 1999.** «*Les tempêtes exceptionnelles de 1999 : caractérisation météorologique et lien éventuel avec le changement climatique*», dans : Birot, Y., Landmann, G., Bonhême, I. (sous la direction de), *La forêt face aux tempêtes.* Éditions Quae. ISBN : 978-2-7592-0330-7. p 37-46.
- Besson, J., Hontarrède, M., Macé, R., Mayençon, R., 1996.** *Météo pratique en Méditerranée.* Edit. Nathan, 263 p.
- Blais, J. R., 1983.** *Trends in the frequency, extent, and severity of spruce budworm outbreaks in eastern Canada.* Revue canadienne de recherche forestière, 13:(4) 539-547.
- Boose, E.R., Foster, D.R., Fluet, M., 1994.** *Hurricane impacts to tropical and temperate forest landscapes.* Ecol. Monogr. 64: 369-400.
- Boose, E.R., Chamberlin, K.E. and Foster, D.R., 2001.** *Landscape and regional impacts of hurricanes in New England.* Ecol. Monogr. 71: 27-48.

- Bordeau, C., M. Chabot, J., Fortin, G., Gagnon, M., Huot, L., Innes, C., Lachance, L., Marchand, L., Morneau, L., Paré, D., Premont, M., Simard, S., 2006.** *Insectes, maladies et feux dans les forêts québécoises*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. Direction de l'environnement et de la protection des forêts, Québec. 70 p.
- Boubaker, H. B., Fehri, N., 2009.** *Vents forts et vents extrêmes dans les principales villes côtières de la Tunisie*: Mise au point méthodologique et résultats préliminaires. Géographia Technica, Numéro spécial 2009, p 59-66.
- Bouchard, M., 2008.** « *La sylviculture dans un contexte d'aménagement écosystémique en forêt boréale et en forêt mixte* », dans Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., De Grandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P., Bergeron, Y. (sous la direction de), *Aménagement écosystémique en forêt boréale*. Presse de l'université du Québec. Québec. p. 335-359.
- Bouffard, D., Doyon, F., Forget, E., 2003.** *Historique et dynamisme écologique de la végétation forestière de la réserve faunique Rouge-Matawinde 1930 à nos jours* Rapport scientifique. Institut Québécois d'Aménagement de la Forêt Feuillue. 113 p.
- Bourque, A., Simonet, G., 2008.** « *Québec* », dans *Vivre avec les changements climatiques au Canada* : édition 2007, Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J., Bush, E (éditeurs), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), pp. 171-226.
- Bruce, J. P., 2011.** *Climate change information for adaptation - Climate trends and projected values for Canada from 2010 to 2050*. Institute for Catastrophic Loss Reduction. ISBN 978-0-9784841-7-0. 54 p.
- Canham, C.D., and Loucks, O.L., 1984.** *Catastrophic windthrow in the presettlement forests of Wisconsin*. Ecology. 65(3): 803-809.
- Canham, C.D., Papaik, M.J., and Latty, E., 2001.** *Interspecific variation in susceptibility to windthrow as a function of tree size and storm severity of northern temperate tree species*. Canadian journal of forest research. 31: 1-10.
- Cassou, C., 2004.** *Du changement climatique aux régimes de temps: l'oscillation nord-atlantique*. La météorologie N° 45.
- Centre canadien sciences et médias, 2011.** *Regard sur les tornades*. [en ligne] http://www.sciencemediacentre.ca/smc/docs/tornadoes_f.pdf
- Chapin, F.S., Matson, P.A., and Mooney, H.A., 2002.** *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer-Verlag, New York, NY. 436 p.

- Coles, S., 2001.** *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer, 208 p.
- Colin, F., Vinkler, I., Riou-Nivert, P., Renaud, J-P., Hervé, J-C., Bock, J., Piton, B., 2009.** «Facteurs de risques de chablis dans les peuplements forestiers : les leçons tirées des tempêtes de 1999», dans Birot, Y., Landmann, G., Bonhême, I. (sous la direction de), *La forêt face aux tempêtes*. Éditions Quae. ISBN : 978-2-7592-0330-7. p 177-228.
- Collins, J., 1988.** *Cyclone Bola and its impact on the forestry sector*. New Zealand Forestry. 33 (1) : 4-5.
- Corvol, A., 2009.** «Grands vents et chablis : aspects historique du XVI^e au XIX^e siècle », dans Birot, Y., Landmann, G., Bonhême, I. (sous la direction de), *La forêt face aux tempêtes*. Éditions Quae. ISBN : 978-2-7592-0330-7. p15-27.
- Côté, M., 2000.** *Dictionnaire de la foresterie*. Ordre des ingénieurs forestiers du Québec. Les Presses de l'Université Laval. Canada. ISBN 2-7637-7742-2.
- Danjon, F., Drénou, C., Dupuy, L., Lebourgeois, F., 2009.** «Racines, sol, mécanique de l'ancrage de l'arbre et stabilité», dans Birot, Y., Landmann, G., Bonhême, I. (sous la direction de), *La forêt face aux tempêtes*. Éditions Quae. ISBN : 978-2-7592-0330-7. p 155-176.
- Deraps, D., 2008.** *L'effet du patron de répartition des coupes et des variables du milieu sur les pertes par chablis dans les lisières. Cas de la pessière à mousse de l'Est*. Mémoire de maîtrise. Université de Laval. 80 p.
- Desai, A. R., Austin, J.A., Bennington, V., McKinley, G.A., 2009.** *Stringer winds over a large lake in response to weakening air-to-lake temperature gradient*. Nature Geoscience, vol 2. déc.
- Dotto, L., Duchesne, L., Etkin, D., Jaffit, E., Joe, P., Jones, B., Koshida, G., Leblon, B., Opoku-Boateng, E., Schenk, K., Stefanovic, I., Stocks, B., 2010.** *Canadians at risk:Our exposure to natural hazards*. ICLR research paper series – number 48. ISBN: 978-0-9784841-5-6. 223 p.
- Doyon, F., Bouffard, D., 2008.** *Étude sur le bois mort, les microsites et la génération après chablis catastrophiques dans les érablières du Témiscamisque*. Rapport technique. IQAFF. 44 p.

Dufresne, J.-L., Salas y Mélia, D., Denvil, S., Tyteca, S., Arzel, O., Bony, S., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Caubel, A., Chauvin, F., Déqué, M., Douville, H., Fairhead, L., Fichefet, T., Foujols, M.-A., Friedlingstein, P., Gueremy, J.-F., Hourdin, F., Idelkadi, A., Levy, C., Madec, G., Marquet, P., Marti, O., Musat, I., Planton, S., Royer, J.-F., 2006. *Simulation de l'évolution récente et future du climat par les modèles du CNRM et de l'IPSL.* http://web.lmd.jussieu.fr/~jldufres/publi/2006/IPCC_CNRM_IPSL_LaMet_v4.pdf. 14 p.

Elmqvist, T., Rainey, W. E., Pierson E. D., Cox, P. A., 1994. *Effects of tropical cyclones Ofa and Val on the structure of a Samoan Lowland rain forest.* Biotropica, Vol 26, N° 4 : 384-391.

Environnement Canada., 2007. *La Tornado à Elie est reclassifiée à la plus haute cote sur l'échelle des dommages – La première tornade F5 officielle du Canada.* [en ligne]. <http://www.ec.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=714D9AAE-1&news=4B3DE57E-4967-4B09-98D6-EF974B32D6B5>

Environnement Canada., 2009a. *Les dix événements météorologiques les plus marquants de 2004.* [en ligne]. <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=E7899936-1>

Environnement Canada., 2009b. *Les dix événements météorologiques les plus marquants au Canada en 2009.* [en ligne]. <http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=EA4C0989-1>

Environnement Canada., 2010a. *Risque d'été – Tornades.* [en ligne]. [www.ec.gc.ca.
http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=6C5D4990-1#tornades](http://www.ec.gc.ca/meteo-weather/default.asp?lang=Fr&n=6C5D4990-1#tornades)

Environnement Canada., 2010b. *Les tempêtes de vent.* [en ligne]. <http://ontario.hazards.ca/maps/background/Windstorm-f.html>

Environnement Canada., 2010c. *Emplacement du vent et graphiques de rayon – emplacement des vents les plus forts par quadrant.* [en ligne]. <http://www.ec.gc.ca/hurricane/default.asp?lang=fr&n=52420F95-1>

Everham, E. M., Brokaw, N. V. L., 1996. *Forest damage and recovery from catastrophic wind.* The Botanical Review, Vol 62, N° 2 : 113-185.

Everham, E. M., 1996. *Hurricane disturbance and recovery: an empirical and simulation study of vegetation dynamics in the Luquillo Experimental Forest, Puerto Rico.* Dissertation. State University of New York, College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, New York, USA.

- Finnigan, J.J. and Brunet, Y., 1995.** *Turbulent airflow in forest on flat and hilly terrain.* Wind and Trees, M. Coutts et J. Grace Ed., Cambridge University Press, Cambridge, 3-40.
- Forget, E., Drever, R. and Lorenzetti, F., 2003.** *Changements climatiques : impacts sur les forêts québécoises.* Revue de littérature. IQAFF. 57 p.
- Foster, D.R., 1988.** *Species and stand response to catastrophic wind in central New England, U.S.A.* J. Ecol. 76: 135-151.
- Frelich, L.E., Lorimer, C.G., 1985.** *Current and predicted long-term effects of deer browsing in hemlock forests in Michigan, USA.* Biol. Conserv. 34, 99-120.
- Frelich, L.E., Lorimer, C.G., 1991.** *Natural disturbance regimes in hemlock-hardwood forest of the Upper Great Lakes region.* Ecol. Monogr. 61: 145-164.
- Fujita, T.T., 1978.** *Manuel of dowburst identification.* Dans **Canham, C. D., Loucks, O. R., 1984.** *Catastrophic Windthrow in the Presettlement Forests of Wisconsin.* Ecology, Vol. 65, No. 3, 803-809.
- Fujita, T. T., 1981.** *Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales.* Journal of the atmospheric sciences. Vol. 38, no.8, pp. 1511-1534.
- Fujita, T. T., 1985.** *The downburst.* SMRP Res. Paper No. 210, NTIS PB-85-148880. 122 pp.
- Gauthier, S., Leduc, A., Harvey, B., Bergeron, Y. and Drapeau, P., 2001.** *Les perturbations naturelles et la diversité écosystémique.* Le naturaliste canadien, vol. 125 N° 3.
- Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Kneeshaw, D., Drapeau, P., Grandpré, L., Claveau, Y., Paré, D., 2008.** « *Aménagement forestier, origines et fondements* », dans Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., De Grandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P., Bergeron, Y. (sous la direction de), *Aménagement écosystémique en forêt boréale.* Presse de l'université du Québec. Québec. p. 13-40.
- GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), 2007.** *Changement climatique - un résumé du Rapport d'évaluation 2007 du GIEC.* 6 p. [en ligne]. <http://www.greenfacts.org/fr/changement-climatique-re4/climate-change-ar4-foldout-fr.pdf>

- Girardin, M. P., Flannigan, M. D., Tardif, J. C., Bergeron, Y., 2008.** « Climatologie, météorologie et feux de forêt », dans Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., De Grandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P., Bergeron, Y. (sous la direction de), *Aménagement écosystémique en forêt boréale*. Presse de l'université du Québec. Québec. p. 83-107.
- Girardin, M. P., Tardif, J., Flannigan, M.D., Wotton, B. M., Bergeron, Y., 2004a.** *Multicentury reconstruction of the Canadian Drought Code from eastern Canada and its relationship with paleoclimatic indices of atmospheric circulation*. *Clim.Dyn.* 23 :99-115.
- Girardin, M. P., Tardif, J., Flannigan, M.D., Wotton, B. M., Bergeron, Y., 2004b.** *Trends and periodicities in the Canadian Drought Code and their relationships with atmospheric circulation for the Southern Canadian boreal forest*. *Can. J. For.* 34: 103-119.
- Gouvernement du Canada, 2010.** *Les tornades au Canada*. [en ligne]. <http://www.getprepared.gc.ca/knw/ris/trn-fra.aspx>
- Gouvernement du Québec (Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs), 2003.** *Zones de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*. Code de diffusion : 2003-3043. 2 p.
- Gouvernement du Québec (Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs), 2004a.** *Document d'information région du centre du Québec*. Code de diffusion : 2004-3527. 16 p.
- Gouvernement du Québec (Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs), 2004b.** *Rapport détaillé du comité scientifique chargé d'examiner le calcul de la possibilité forestière*. Code de diffusion: 2004-3037. 393 p.
- Gouvernement du Québec (Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs), 2004c.** *Système d'information écoforestière*. 84 p.
- Gouvernement du Québec (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune), 2007.** *Insectes, maladies et feux dans les forêts québécoises*. Bibliothèque nationale du Québec. 68 p.
- Gouvernement du Québec (Ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs), 2010a.** *Zone de végétation et domaines bioclimatiques du Québec*. [en ligne]. <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-zones-carte.jsp>

Gouvernement du Québec (Institut national de santé publique), 2010b. *Qu'est-ce qu'une tornade*. [en ligne]. <http://www.monclimatmasante.qc.ca/public/tornades.aspx>

Gouvernement du Québec (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune), 2011a. *Qu'est-ce que le système SIFORT*. [en ligne]. <http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/fimaq/information/fimaq-information-sifort.jsp>

Gouvernement du Québec (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune), 2011b. *Normes de stratification écoforestière, quatrième inventaire écoforestier*. Bibliothèque et archives nationales du Québec 2011. 102 p.

Gouvernement du Québec (Ministère des Ressources naturelles et de la Faune), 2011c. *La livrée des forêts*. [en ligne]. <http://www.mrnfp.gouv.qc.ca/forets/fimaq/insectes/fimaq-insectes-insectes-livree.jsp>

Guyot, G., 1999. *Climatologie de l'environnement*. 2^e édition. Dunod, Paris. 525 p.

Hosking, J. M. R., 1990. *L-Moments: Analysis and estimation of distribution using linear combinations of order statistics*. J. Royal Stat. Soc., 52, 105-124.

Imbert, D., 2002. *Impact des ouragans sur la structure et la dynamique forestières dans les mangroves des Antilles*. Bois et forêts des tropiques N° 273 (3).

James, B. Elsner, Birol, K.A., 1999. *Hurricanes of the North Atlantic*. Oxford University Press, Inc. ISBN 0-19-512-508-8.

Jardon, Y., 2001. *Analyses temporelles et spatiales des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette au Québec*. Dans : Roy, M-E., Doyon, F., Bouffard, D., Nolet, P., 2010. *Historique des perturbations et réponse de la végétation forestière dans l'érablière à bouleau jaune de l'Ouest au Témiscamingue au cours du 20^{ième} siècle*. Rapport technique. Institut Québécois de l'Aménagement de la Forêt Feuillue. 75 p.

Jenkinson, A. E., 1955. *The frequency distribution of the annual maximum (or minimum) of meteorological elements*. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 81, 158-171.

Kneeshaw, D., Lauzon, È., De Römer, A., Reyes, G., Belle-Isle, J., Messier, J., Gauthier, S., 2008. « *Appliquer les connaissances sur les régimes de perturbations naturelles pour développer une foresterie qui s'inspire de la nature dans le sud de la péninsule gaspésienne* », dans Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., De Grandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P., Bergeron, Y. (sous la direction de), *Aménagement écosystémique en forêt boréale*. Presse de l'université du Québec. Québec. p. 215-240.

- Kramer, M.G., Hansen, A. J., Taper, M. L. and Kissinger, E. J., 2001.** *Abiotic controls on long-term windthrow disturbance and temperate rain forest dynamics in southeast Alaska.* Ecological Society of America. p. 2749-2768.
- Laflamme, G., 2005.** *Les pourridiés des arbres : un secret bien gardé.* Phytoprotection : 86 :36-42.
- Lorimer, C.G., 1977.** *The presettlement forest and natural disturbance cycle of northeastern Maine.* Ecology. 58: 139-148.
- McBean, G., and Henstra, D., 2003.** *Climate Change, Natural Hazards and Cities.* Institute for Catastrophic Loss Reduction. Paper Series – No. 31. ISBN 0-9732213-9-9. 16 p.
- McNab, W.H., Greenberg, C.H., Berg, E.C., 2004.** *Landscape distribution and characteristics of large hurricane related canopy gaps in a southern Appalachian watershed.* Forest Ecology and Management 196, 435–447.
- Morin, H., Jardon, Y., Gagnon, R., 2007.** *Relationships between spruce budworm outbreaks and forest dynamics in Eastern North America.* Dans: *Plant Disturbance Ecology : Process and the Response.* Sous la direction de Jonhson, E.A ., Miyanishi, K. Academic Press, Amsterdam, P.B., p. 555-564.
- Morin, H., Laprise, D., Simard, A-A., Amouch, S ., 2008.** « Régime des épidémies de la tordeuse des bourgeons de l'épinette dans l'Est de l'Amérique du Nord », dans Gauthier, S., Vaillancourt, M.-A., Leduc, A., De Grandpré, L., Kneeshaw, D., Morin, H., Drapeau, P., Bergeron, Y. (sous la direction de), *Aménagement écosystémique en forêt boréale.* Presse de l'université du Québec. Québec. p. 165-192.
- Newart, M.J., 1984.** *Canadian tornadoes, 1950-1979.* Atmosphere-Ocean 22 (3) 343-353.
- Nilson, C., Stjernquist, I., Barring, L., Schlyter, P., Jönsson, A. M., Samuelsson, H., 2004.** *Recorded storm damage in Swedish forests 1901–2000.* Forest Ecology and Management. Volume 199, Issue 1, p 165-173.
- Nolet, P., Sougavinsky, S. and Doyon, F., 1999.** *Caractérisation du régime des perturbations naturelles de la Réserve Faunique Papineau-Labelle.* Écoforesterie Consultants. 44 p.
- Nolet, P., Forget, E., Bouffard, D. and Doyon, F., 2001.** *Reconstitution historique du dynamisme du paysage forestier du bassin de La Lièvre au cours du 20^{ième} siècle.* IQAFF. 122 p.

- Palik, B. J., Pregitzer, K. S., 1992.** *The age and height of red maple (Acer rubrum) populations in northern Michigan bighoot aspen (Populus grandidentata) forests.* CAN. J. For. Res. Vol., 22, 1992. pp 1449-1462.
- Pauli, J.N., Bedrosian, B. E., Osterberg, N., 2006.** *Effects of Blowdown on Small Mammal Populations.* The American Midland Naturalist 156(1):151-162.
- Péguy, C., 1970.** *Précis de climatologie.* Masson, Paris, 468 p.
- Peterson, C.J. and Pickett, S.T.A., 1990.** *Microsite and elevational influences on early forest regeneration after catastrophic windthrow.* Journal of Vegetation Science. 1: 657-662.
- Peterson, C.J. and Pickett, S.T.A., 1991.** *Treefall and resprouting following catastrophic windthrow in an old-growth hemlock-hardwoods forest.* Forest Ecology and Management. 42 : 205-217.
- Peterson, C.J., Carson, W.P., McCarthy, B.C., Pickett, S.T.A., 1990.** *Microsite variation and soil dynamics within newly created treefall pits and mounds.* Oikos 58: 39-46.
- Peterson, C. J., 2000a.** *Damage and recovery of tree species after two different tornadoes in the same old growth forest: a comparison of infrequent wind disturbances.* Forest Ecology and Management 135 : 237-252.
- Peterson, C.J., 2000b.** *Catastrophic wind damage to North American forests and the potential impact of climate change.* Science of the total Environment. Volume 262, Issue 3, 287-311.
- Peterson, C. J., 2007.** *Consistent influence of tree diameter and species on damage in nine eastern North America tornado blowdowns.* For. Ecol. Manage. 250: 96-108.
- Peterson, C.T., Andreson, D.M., Cohen, S. J., Cortez-Vázquez, M., Murnane, R.J., Parmesan, C., Phillips, D., Pulwarty, R.S., Stone, J.M.R., Houston, T.G., Cutter, S. L., Gall, M., 2008.** «*Why weather and climate extremes matter*», dans *Weather and climate extremes in a changing climate.* The U.S Climate Change Science program. 180 p.
- Philibert, Y., Labbé, F., Huot, M. et Chabot, M., 2009.** *Portrait de l'évolution de la forêt publique sous aménagement du Québec méridional des années 1970 aux années 2000.* MRNF, Forêt Québec, DIF et DEPF.

- Pickett, S.T.A. and White, P.S. (Eds.), 1985.** *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press, Orlando etc., 204 pp.
- Pignard, G., Dupouey, J.L., Granier, A., Morel, M., 1999.** «Impact des tempêtes de 1999 sur le bilan de carbone des forêts françaises», dans : Birot, Y., Landmann, G., Bonhême, I. (sous la direction de), *La forêt face aux tempêtes*. Éditions Quae. ISBN : 978-2-7592-0330-7. p 143-151.
- Renaud, J. P., 2002.** *Première évaluation de la sensibilité des peuplements forestiers aux tempêtes à partir des dommages subis par le réseau européen*. Les Cahiers su DSF, 1 : 81-84. Dans : **Danjon, F., Drénou, C., Dupuy, L., Lebourgeois, F., 2009.** «*Racines, sol, mécanique de l'ancrage de l'arbre et stabilité*», dans Birot, Y., Landmann, G., Bonhême, I. (sous la direction de), *La forêt face aux tempêtes*. Éditions Quae. ISBN : 978-2-7592-0330-7. p 155-176.
- Renaud, J. P., 2005.** *Contribution à l'élaboration d'un outil de diagnostic de stabilité des peuplements aux chablis*. Note interne IFN Nancy, 9 p. Dans : **Danjon, F., Drénou, C., Dupuy, L., Lebourgeois, F., 2009.** «*Racines, sol, mécanique de l'ancrage de l'arbre et stabilité*», dans Birot, Y., Landmann, G., Bonhême, I. (sous la direction de), *La forêt face aux tempêtes*. Éditions Quae. ISBN : 978-2-7592-0330-7. p155-176.
- Renaud, J. P., Hervé, J. C., 2005.** *Contribution à l'étude de l'effet «mélange» et «structure» des peuplements sur la sensibilité aux chablis*. Note interne, IFN Nancy, 21 p. Dans : **Danjon, F., Drénou, C., Dupuy, L., Lebourgeois, F., 2009.** «*Racines, sol, mécanique de l'ancrage de l'arbre et stabilité*», dans Birot, Y., Landmann, G., Bonhême, I. (sous la direction de), *La forêt face aux tempêtes*. Éditions Quae. ISBN : 978-2-7592-0330-7. p155-176.
- Rich, R. L., Frelich, L. E., Reich, P. B., 2007.** *Wind-throw mortality in the southern boreal forest: effects of species, diameter and stand age*. *Journal of Ecology*. 95 : 1261-1273. Dans : **Manka, F., 2010.** *Effet du chablis sur la dynamique des peuplements forestiers mixtes*. Mémoire. Université du Québec à Montréal.
- Robitaille, A. et Saucier, J.-P., 1998.** *Paysages régionaux du Québec méridional*. MRN, Gouvernement du Québec. Éd. Les publications du Québec. 213 p.
- Rosa, J., 2004.** *Construction d'une méthode de diagnostic de stabilité*. Étude complémentaire aux analyses de Hervé J.C. et Piton B. Rapport interne. IDF Orléans, 76 p. Dans : **Danjon, F., Drénou, C., Dupuy, L., Lebourgeois, F., 2009.** «*Racines, sol, mécanique de l'ancrage de l'arbre et stabilité*», dans Birot, Y., Landmann, G., Bonhême, I. (sous la direction de), *La forêt face aux tempêtes*. Éditions Quae. ISBN : 978-2-7592-0330-7. p155-176.

- Roy, M-E., Doyon, F., Bouffard, D., Nolet, P., 2010.** *Historique des perturbations et réponse de la végétation forestière dans l'érablière à bouleau jaune de l'Ouest au Témiscamingue au cours du 20^e siècle.* Rapport technique. Institut Québécois de l'Aménagement de la Forêt Feuillue. 75 p.
- Ruel, J.-C., and Benoit, R., 1999.** *Analyse du Chablis du 7 novembre 1994 dans les régions de Charlevoix et de la Gaspésie, Quebec, Canada.* The Forestry Chronicle. Vol. 75, No. 2.
- Ruel, J.-C., 2000.** *Factors influencing windthrow in balsam fir forests: From landscape studies to individual tree studies.* Forest Ecology and Management 135(1-3):169-178.
- Scherrer, B., 1984.** *Biostatistique.* Gaëtan Morin Éditeur Ltée. 850 p.
- Scherrer, B., 2007.** *Biostatistique, Volume 1.* Gaëtan Morin Éditeur Ltée. 816 p.
- Siegismund, F., Schrum, C., 2001.** *Decadal changes in the wind forcing over the North Sea.* Clim Res. Vol. 18:39-45.
- Sousa, W.P., 1984.** *The role of disturbance in natural communities.* Ann. Rev. Ecol. Syst. 15: 353-391.
- Stach, N., Deshayes, M., 2009.** «Estimation des dégâts de tempête : l'œil, l'avion et le satellite», dans : Birot, Y., Landmann, G., Bonhême, I. (sous la direction de), *La forêt face aux tempêtes.* Éditions Quae. ISBN : 978-2-7592-0330-7. p 49-68.
- Steinblums, I.J., 1978.** *Streamside buffer strips: survival effectiveness and design.* M.Sc. Thesis. Oregon State University, Oregon.
- Schwartz, P., and Randall, D. 2003.** *An abrupt climate change scenario and its implications for United States National Security.* Washington, DC: Environmental Media Services. 25 p.
- Ulanova, N.G., 2000.** *The effects of windthrow on forests at different spatial scales: a review.* Forest Ecology and Management 135: 155-167.
- Vaillancourt, M-A., 2008.** *Effets des régimes de perturbation par le chablis sur la biodiversité et les implications pour la récupération.* Ministère des Ressources naturelles et de la Faune, Direction du développement socio-économique, des partenariats et de l'éducation et Service de la mise en valeur de la ressource et des territoires fauniques. 58p.

- Vezina, P. É. et Paillé, G., 1969.** *Aménagement intensif des sapinières mûres et surannées à la Forêt Montmorency.* Fonds de recherches forestières de l'Université Laval, contribution no 14.48 pp.
- Webb, S.L., 1989.** *Contrasting windstorm consequences in two forests, Itasca State Park, Minnesota.* Ecology 70:1167-1180.
- Zhang, Q., Pregitzer, K. S. and Reed, D. D., 1999.** *Catastrophic disturbance in the presettlement forests of the upper Peninsula of Michigan.* Can. J. For. Res. 29: 106-114.

ANNEXE 1

Caractéristiques des quatre sous-régions écologiques du domaine de l'érablière à bouleau jaune

		Régions écologiques			
		Est	Centre-est	Centre-ouest	Ouest
Utilisation du territoire (%)	Forestier	82	94	97	100
	Urbain	<1	1	3	<1
	Agricole	17	5	<1	0
	Déchets miniers	<1	0	0	0
Topographie	Altitude moyenne (m)	400	292	299	315
	Pente (%)	6.9	13.8	11.3	8.3
	Amplitude moyenne (m)	99.4	126.4	109.5	81.3
Géologie	Relief dominant	Coteaux	Hautes collines	Hautes collines	Collines
	Dépôt de surface dominant	Till indifférencié épais	Till indifférencié épais	Till indifférencié mince	Till indifférencié mince
Climat	Couvert neigeux (cm)	307	270	275	225
	Indice d'aridité	114	157	150	176
	Printemps	NO	NO et NE	NO	NO
	Été	O	SO	SO	SO
	Automne	O	SO	SO	SO
	Hiver	NO	NO	SO et NO	SO

Suite du tableau précédent

		Régions écologiques			
		Est	Centre-est	Centre-ouest	Ouest
Climat	Vitesse	4.08	4.15	3.89	3.85
	moyenne	3.46	3.69	3.43	3.22
	du vent à				
	30 m du sol	4.19	4.40	4.15	4.08
	(m/s)	4.88	4.88	4.46	4.32

ANNEXE 2 Attributs des stations météorologiques

Données	Nom station	Latitude *	Longitude *	Sous-régions écologiques	Année
Horaires journalières	Sherbrooke A	45,43	-71,68	Est	1962-2009
	Thetford Mines RCS	46,05	-71,27		2006-2009
	Beauceville	46,20	-70,78		1994-2009
	La Pocatière	47,36	-70,03		1996-2009
	L'Assomption	45,80	-73,43	Centre-est	1994-2009
	Québec/Jean Lesage Intl A	46,80	-71,38		1960-2009
	Rawdon	46,02	-73,81		2005-2007
	St-Lin-Laurentides	45,85	-73,70		2004-2007
	Shawinigan	46,56	-72,73		1999-2009
	Ste-Agathe des Monts	46,05	-74,28		1965-1992
	La Tuque	47,41	-72,79		1992-2009
	Piedmont	45,88	-74,09		2003-2007
	Chatham- Brownsburg	45,62	-74,41		2004-2007
	St-Jovite	46,08	-74,56	Centre-ouest	1992-2009
	Maniwaki UA	46,30	-76,01	Ouest	1960-1993
	Maniwaki Airport	46,27	-75,99		1993-2009
	Barrage Temiskamingue	46,71	-79,10		1997-2009

* : Exprimé en degrés et fraction décimale de degré.

Suite du tableau précédent.

Données	Nom station	Latitude *	Longitude *	Sous-régions écologiques	Année
Rafales maximales journalières	Sherbrooke A	45,43	-71,68	Est	1992-2009
	Thetford Mines RCS	46,05	-71,27		2006-2009
	Beauceville	46,21	-70,79		1994-2009
	La Pocatière	47,36	-70,03		1996-2009
	L'Assomption	45,80	-73,43	Centre-est	1994-2009
	Québec/Jean Lesage Intl A	46,80	-71,38		1960-1995
	Shawinigan	46,56	-72,73		1998-2009
	Ste-Agathe des Monts	46,05	-74,28		1966-1992
	La Tuque	47,41	-72,79		1994-2009
	St-Jovite	46,08	-74,56	Centre-ouest	1994-2009
	Maniwaki UA	46,30	-76,01	Ouest	1980-1992
	Maniwaki Airport	46,27	-75,99		1993-2009
	Barrage Temiskamingue	46,71	-79,10		1996-2009

* : Exprimé en degrés et fraction décimale de degré.